



Sähkönlaadun mittaukset

Juho Lehtonen

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2014
Sähkötekniikan ko.
Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikka

LEHTONEN, JUHO:
Sähkönlaadun mittaukset

Opinnäytetyö 69 sivua, joista liitteitä 23 sivua
Huhtikuu 2014

Tässä opinnäytetyössä käsitellään Turun seudun puhdistamo Oy:n kakolanmäen jätevedenpuhdistamon sähköverkon sähkönlaatua. Puhdistamolle tehtiin yliaaltomittaukset, joiden tarkoituksena oli kartoittaa sähköverkon sisältämät yliaallot ja näin pystyä parantamaan sähkönlaatua.

Laitoksen kuormana on paljon erilaisia taajuusmuuttajakäyttöjä ja valaistuksessa käytetään purkauslamppuja. Näiden sähkölaitteiden tiedetään tuottavan verkkoon yliaaltoja. Yliaallot voivat pahimmassa tapauksessa aiheuttaa muiden sähkölaitteistojen ennenaikaisia rikkoontumisia.

Mittauksista ilmeni sähköverkon sisältävän yliaaltoja. Yliaaltojen määrä oli kuitenkin vähäinen, joten niiden suodatus ei ole tarpeellista. Laitoksen mahdollisessa laajennuksessa tai muutostöissä on otettava huomioon nykyinen yliaaltopitoisuus ja toteuttaa laajennus- tai muutostyöt nykyiset yliaaltopitoisuudet huomioonottaen.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Bachelor's degree of electrical engineering
Electric power engineering

LEHTONEN, JUHO:
Quality of electricity measurements

Bachelor's thesis 69 pages, appendices 23 pages
April 2014

This thesis deals with the quality of the electricity grid of Turun seudun puhdistamo Oy. There were done the harmonic measurements to the electricity grid of the facility. The goal of the measurements was to identify the harmonics in the electricity grid.

A lot of different drives and discharge lamps are used as electrical load. These electrical loads are known as a producer of harmonics. In the worst situation the harmonics can cause early breakdowns to the electrical devices.

The harmonics were found by the measurements. The amounts of the harmonics were so low that the need of the filter was not necessary. The content of harmonics must be taken into consideration if there's coming an enlargement or modifications in the facility.

Key words: the quality of electricity, harmonics

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	JÄNNITTEEN LAATU	7
2.1	Jakelujännitteen laatu.....	7
2.2	Jakelujännitteen verrattavuus teollisuuteen	8
3	TEORIA	9
3.1	Vaihtosähköjärjestelmän perusteet	9
3.2	Fourier-analyysi ja yliaallot	10
3.3	Harmoniset yliaallot.....	12
3.3.1	Kolmas yliaalto	12
3.3.2	Muut parittomat yliaallot.....	15
3.4	Yliaaltojen summautuminen perusaaltoon.....	16
3.5	Yliaaltojen vaikutus johtimien mitoitukseen	18
4	SUOTIMET.....	22
4.1	Passiivisuotimet	22
4.1.1	Yhdelle taajuudelle viritetty passiivisuodin	22
4.1.2	Monelle taajuudelle viritetty passiivisuodin	23
4.2	Aktiivisuodin	24
5	MITTAUKSET	26
5.1	Mitattavat kohteet	26
5.2	Käytetyt mittausvälineet	30
5.3	Mittaustulokset ja kommentit	31
5.3.1	Prosessi- sekä kiinteistöpuoli 1C1-PK1	32
5.3.2	Prosessi- sekä kiinteistöpuoli 1C4-PK2	36
5.3.3	Valaistuskeskus 1C4-KRK22.....	41
6	JOHTOPÄÄTELMÄT JA YHTEENVETO	44
	LÄHTEET.....	47
	LIITTEET	48
	Liite 1. Mittaustulokset, 1C1-PK1	48
	Liite 2. Mittaustulokset, 1C4-PK2	54
	Liite 3. Mittaustulokset, 1C4-PK2 prosessipuoli ennen ja jälkeen muuntajan vaihtoa.....	60
	Liite 4. Mittaustulokset, 1C4-KRK22 suurpainenatriumlampuilla ja loisteputkivalaisimilla	65

LYHENTEET JA TERMIT

TSP	Turun seudun puhdistamo
THD-R	Total Harmonic Distortion, harmoninen särö suhteessa tehollisarvoon
THD-F	Total Harmonic Distortion, harmoninen särö suhteessa perusaaltoon
yliaalto	Jännite tai virta, jonka taajuus on yli verkkotaajuuden

1 JOHDANTO

Sähkötekniikan kehittyminen tapahtuu huimaa vauhtia sekä laitteisiin lisääntynyt elektroniikan määrä on kasvanut valtavasti. Sähkölaitteista aiheutuvat pienet häiriöt kasvavat suuriksi tekniikan lisääntyessä. Lisääntyneiden sähkölaitteiden määrästä ja niiden kasvattamista häiriöistä on syytä tarkkailla sähkönlaatua. Teollisuuden laitoksissa, joissa käytetään moottoreita, on siirrytty perinteisistä tähti-kolmio käynnistyksestä tai vastaavista taajuusmuuttaja käynnisteisiin. Tällaiset sähkökäytöt ovat erittäin tunnettuja niiden aiheuttamista yliaalloista sähköverkkoon.

Suuren sähkölaitteistomäärän ja sen sisältämän tekniikan takia tehtiin yliaaltomittaukset Turun seudun puhdistamo Oy:lle. Laitoksella käytetään paljon tekniikkaa, joiden tiedetään aiheuttavan yliaaltoja sähköverkkoon, joten tarkoituksena oli kartoittaa yliaaltojen määrät laitoksen sähköverkossa. Mittaukset tehtiin Fluke 434 – verkkoanalysaattorilla.

Yliaaltojen haittana on niistä johtuvat häviöt ja niistä aiheutuvat lisäkustannukset, mahdolliset virrehälytykset ja jopa aiheuttaa laitteille ennenaikaisia rikkoontumisia. Yliaaltojen määrää on mahdollista vähentää erilaisilla suotimilla.

Haluan kiittää erityisesti työn tilaajan yhteyshenkilöä Esa Malmikarea erinomaisesta yhteistyöstä. Kiitän myös työn ohjaajaa Lauri Hietalahtea sekä muita yhteistyökumppaneita työnohjauksesta. Lisäksi haluan erityisesti kiittää läheisiäni kannustamisesta sekä opintojeni tukemisesta.

2 JÄNNITTEEN LAATU

Standardissa EN 50160 annetaan jakelujännitteelle tietyt rajat sähkönlaadun takaamiseksi. Jakelupisteessä jännitteen pitää täyttää nämä annetut arvot.

2.1 Jakelujännitteen laatu

Jakelujännitteen laadun varmistamiseksi on sille asetettu rajoitettu määrä sallittavia harmonisia yliaaltokomponentteja. SFS-EN 50160:ssa on annettu seuraavanlainen standardi sallituille harmonisille yliaaltokomponenteille.

”Normaaleissa käyttöolosuhteissa, kunkin pituisen mittausjakson aikana, 95 % jakelujännitteen kunkin yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin keskimääräisistä tehollisarvoista tulee olla pienempi tai yhtäsuuri kuin taulukossa 1 annettu arvo. Resonanssit voivat aiheuttaa suurempia jännitteitä yksittäiselle harmoniselle.

Lisäksi jakelujännitteelle kokonaissärökertoimen, THD (mukaan lukien kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40 saakka) tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %.” (SFS-EN 50160, s.22)

TAULUKKO 1. SFS-EN 50160:ssä määritetyt rajat yliaaltokomponenteille. (SFS-EN 50160, s.22)

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset			
Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (U_h)	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (U_h)	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (U_h)
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

HUOM. Järjestysluvultaan yli 25 harmonisille ei anneta arvoja, koska ne ovat tavallisesti pieniä ja hyvin arvaamattomia resonanssitilanteiden vuoksi.

Toistaiseksi epäharmonisille yliaaltokomponenteille ei ole määritetty mitään rajatasoja. Rajatasoja harkitaan kuitenkin kasvavan taajuusmuuttajien ja vastaavien säätölaitteiden lisääntymisen vuoksi. (SFS-EN 50160, s.22)

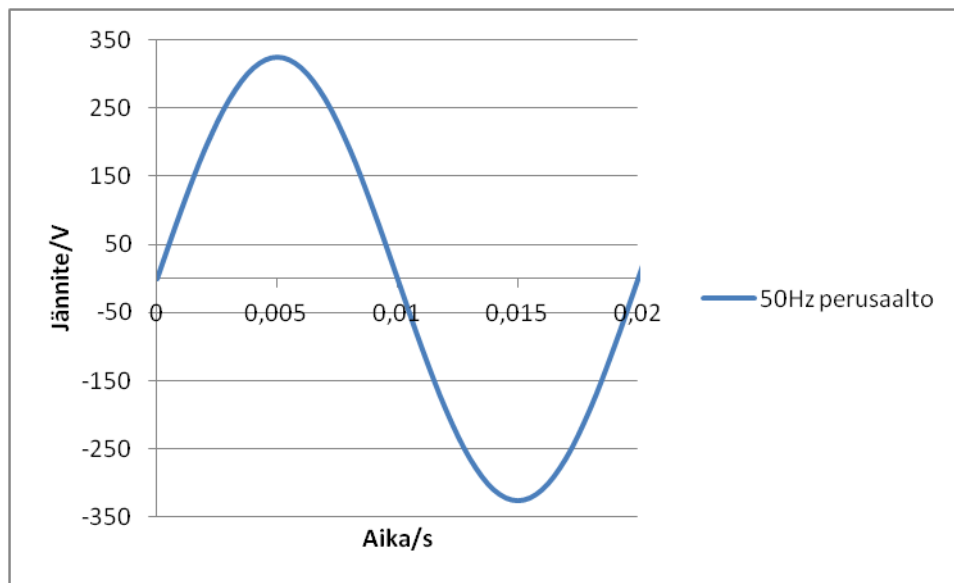
2.2 Jakelujännitteen verrattavuus teollisuuteen

Jakelujännitteen laadulle asetettua standardia voimme käyttää ohjearvoina teollisuuskäytössä, koska sille ei ole asetettu omia vaatimuksia jännitteen laadun suhteen. Näitä ohjearvoja käyttämällä sähkönlaatu pysyy vähintäänkin asiallisena.

3 TEORIA

3.1 Vaihtosähköjärjestelmän perusteet

Sähköverkon jännite on sinimuotoista. Sinimuotoisen jännitteen kuvaajasta (kuva 1) pystytään helposti katsomaan sen jaksonaika ja huippuarvo. Näiden tietojen perusteella voidaan laskea taajuus, tehollisarvo ja hetkellisarvo.



KUVA 1. Puhdas siniaalto, jonka taajuus on 50 Hz.

Yllä olevasta kuvaajasta voidaan katsoa sen jaksonaika, joka on 0,02 sekuntia ja huippuarvo, joka on noin 325 V. Jaksonajan perusteella voidaan laskea taajuus (kaava 1): (Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S., Öistämö, J., Tekniikan kaavasto)

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,02 \text{ s}} = 50 \text{ Hz} \quad (1)$$

,jossa

f = taajuus, Hz

T = jaksonaika, s

Sinimuotoisen jännitteen tehollisarvo voidaan laskea kun tiedetään sen huippuarvo (kaava 2). (Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S., Öistämö, J., Tekniikan kaavasto, s.75)

$$U_{rms} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} = \frac{325 \text{ V}}{\sqrt{2}} \approx 230 \text{ V} \quad (2)$$

jossa

\hat{u} = jännitteen huippuarvo, V

U_{rms} = jännitteen tehollisarvo, V

Sinimuotoisesta jännitteestä voidaan laskea sen hetkellinen jännitteen arvo millä tahansa ajan hetkellä (kaava 3). Lasketaan jännitteen arvo kun aikaa on kulunut 7 ms. (Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S., Öistämö, J., Tekniikan kaavasto)

$$u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t + \varphi_u), \quad \varphi_u = 0 \quad (3)$$

$$u(0,007s) = 325 \text{ V} \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,007 \text{ s}) \approx 263 \text{ V}$$

jossa

t = haluttu ajan hetki, s

3.2 Fourier-analyysi ja yliaallot

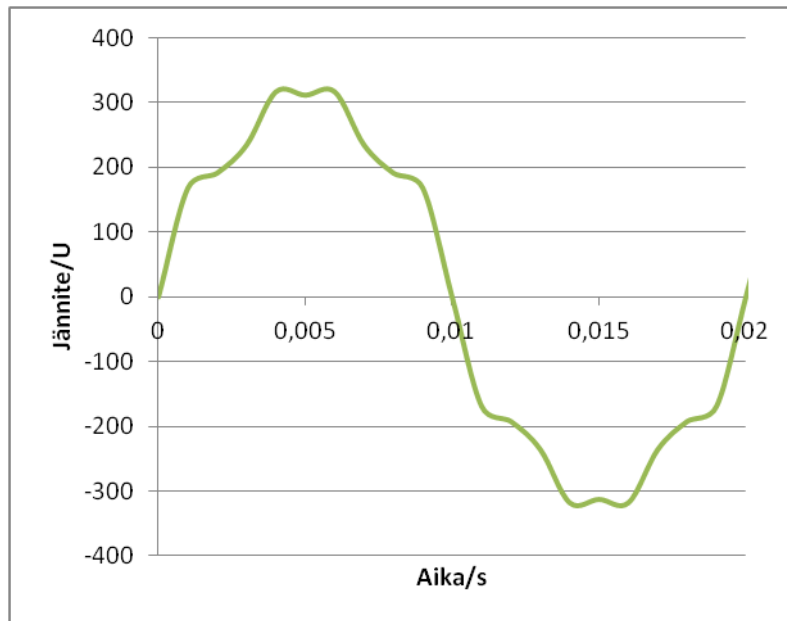
”Kun jännitteen tai virran käyrämuoto poikkeaa sinimuodosta, voidaan ajatella sen olevan muodostunut useasta eritaajuisesta sinimuotoisesta signaalista. Funktio voidaan hajottaa komponentteihinsa käyttämällä Fourier-analyysia, johon yliaaltojen matemaattinen käsittely perustuu.” (Korpinen, L., Mikkola, M., Keikko, T., Falck, E., Yliaalto-opus, s.3)

Fourier’n kaavalla (kaava 4) voimme siis hajottaa säröytyneen sinimuotoisen signaalin eri komponentteihin. Fourier’n sarjakehitelmä on esitelty alla. (Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S., Öistämö, J., Tekniikan kaavasto, s.75)

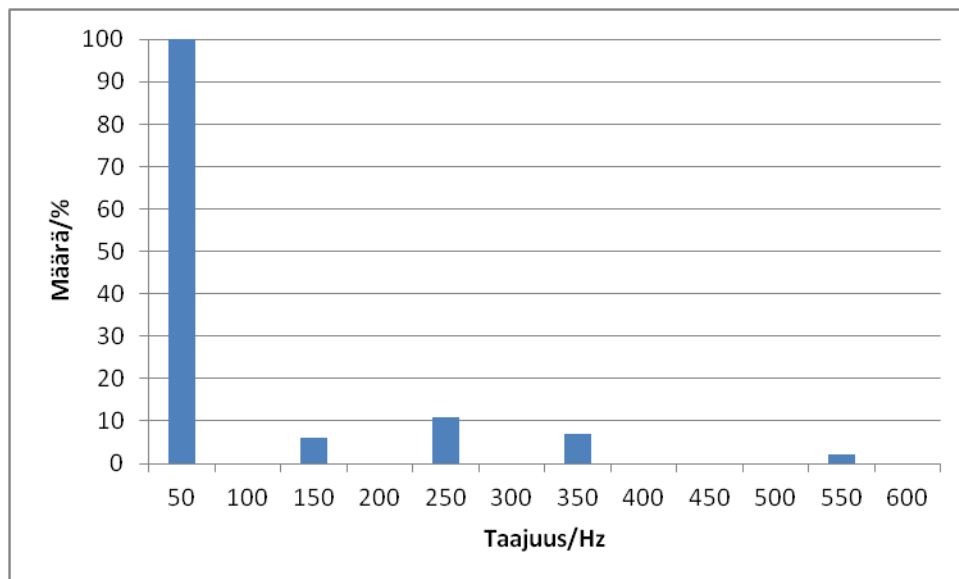
$$f(x) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(n \frac{2\pi}{T}x\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(n \frac{2\pi}{T}x\right) \quad (4)$$

Komponentteihin jaetusta signaalista voidaan muodostaa viivaspektri, jossa kuvataan erikseen jokaisen komponentin osuus signaalin perusaallosta. Alla on esitetty esimerkki

säröytyneen jännitteen kuvaaja 50Hz verkosta, joka on myös hajotettu komponentteihin (kuva 2 ja 3).



KUVA 2. Säröytynyt jännitteen kuvaaja 50Hz verkossa.

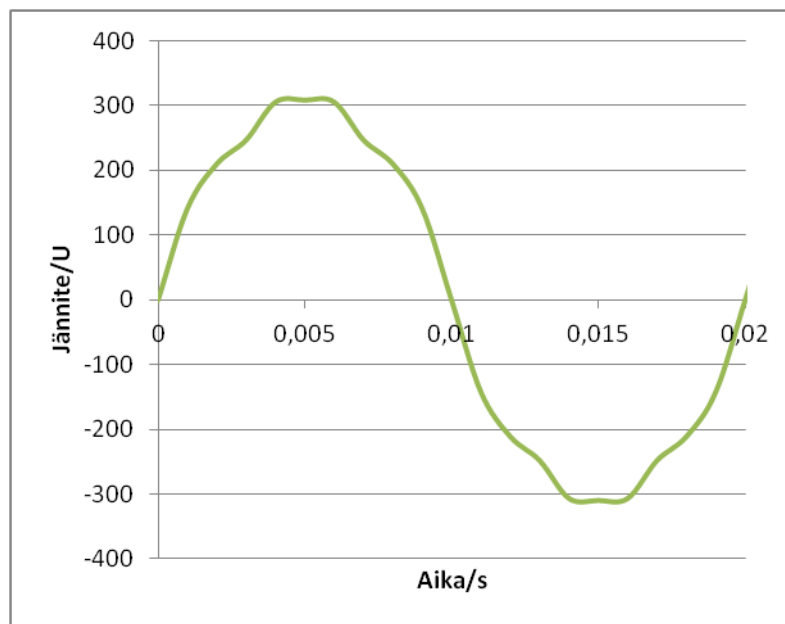


KUVA 3. Jännitteen komponentit.

Yllä olevasta kuvaajasta pystyy helposti kertomaan mistä eri komponenteista virran kuvaaja (kuva 2) muodostuu. Kuvaajaa tutkimalla näemme perusaallon taajuuden olevan 50Hz. Lisäksi siitä löytyy 150Hz komponenttia noin 5% perusaallosta. 250Hz komponenttia on noin 10% perusaallosta jne.

3.3 Harmoniset yliaallot

Jännite tai virta eivät ole aina puhtaasti sinimuotoisia. Mahdolliset särötytymät aiheutuvat verkossa olevista harmonisista virran yliaalloista (kuva 4). Säröytyneisyydestä huolimatta on siitä nähtävissä aallon perusmuoto. Alla olevassa kuvassa on esimerkki säröytyneestä siniaallosta yhden jakson ajalta.



KUVA 4. Säröytynyt siniaalto

Mikä tahansa vaihtovirta, jonka jaksot ovat samanlaisia, voidaan hajottaa eri komponentteihin. Jokainen jakso koostuu virran tasakomponentista, perusaallosta sekä harmonisista yliaalloista. Harmoniset yliaallot ovat perustaajuuden kerrannaisia, 50 Hz:n verkossa harmoniset yliaallot voidaan jakaa taajuuden perusteella kolmansiin (150 Hz), viidensiin (250Hz), seitsemänsiin (350 Hz), yliaaltoihin ja niin edelleen. (Teollisuuden sähköasennukset, s.25)

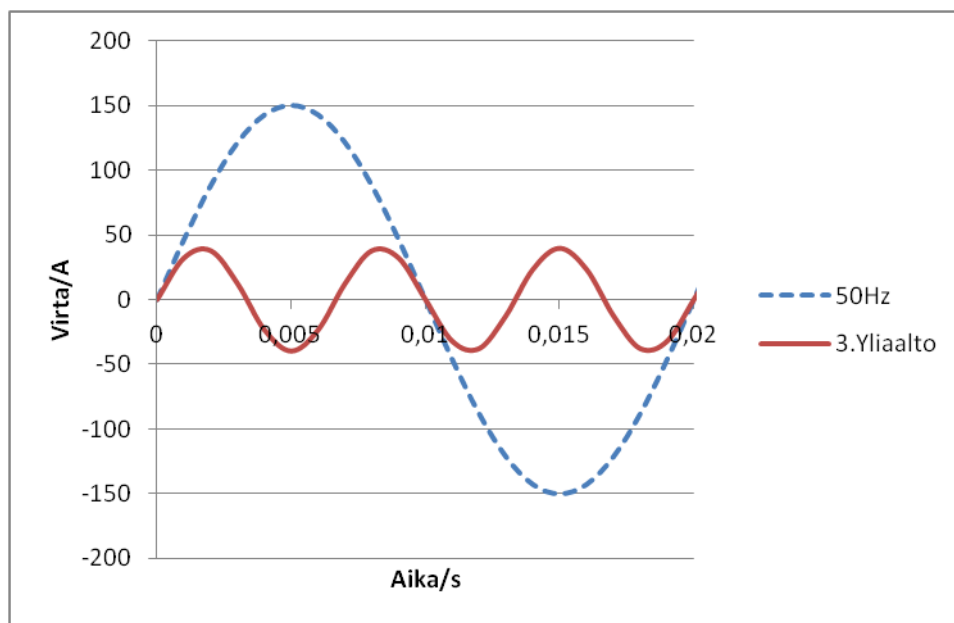
3.3.1 Kolmas yliaalto

150 Hz:n (perustaajuuden ollessa 50 Hz, kuva 5) eli kolmatta yliaaltoa aiheuttavia laitteistoja on monia. Näitä laitteistoja ovat sellaisia, joita useimmat ihmiset käyttävät päivittäin. Kuten esimerkiksi tietokoneet ja kodinelektroniikka. Myös muita kolmatta

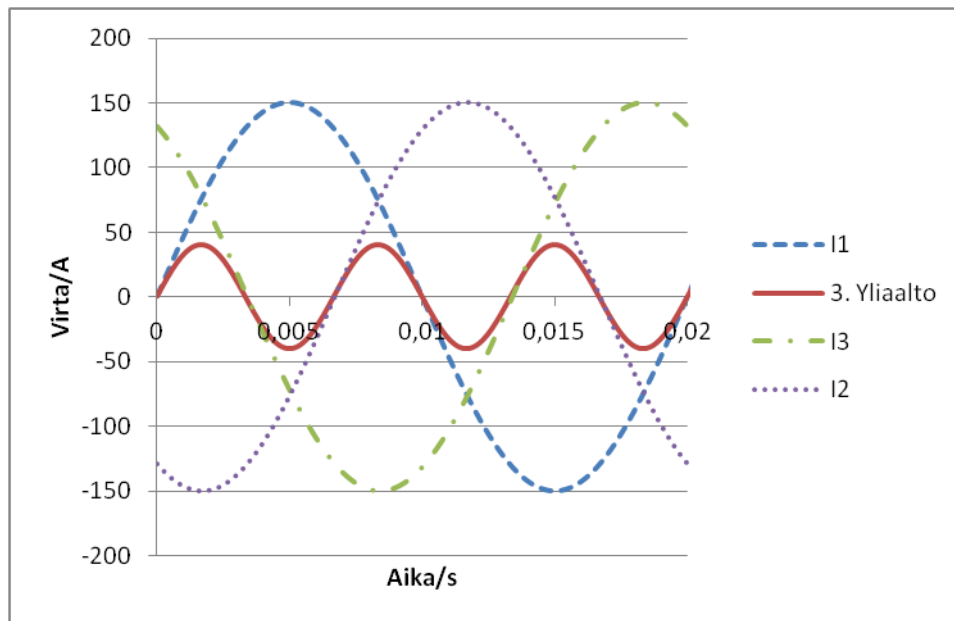
yliaaltoa aiheuttavia laitteistoja ovat seuraavat teollisuuden laitteistot: (ABB Control Oy. Kolmannen yliaallon opas, s.6)

- Purkauslamput
- Hitsauslaitteet
- Varavoimakoneet
- Tasasuuntaajat
- UPSit
- Induktiouunit

Kolmannen yliaallon haittana on sen aiheuttama nollavirta(nollavirta on nollajohtimessa kulkeva virta). Symmetrisessä tasaisesti kuormitetussa kolmivaiheisessa järjestelmässä ei kulje nollavirtaa. Kolmas yliaalto on kolmivaihejärjestelmässä kaikissa vaiheissa saman vaiheinen (kuva 6). (ABB Control Oy. Kolmannen yliaallon opas, s.8)

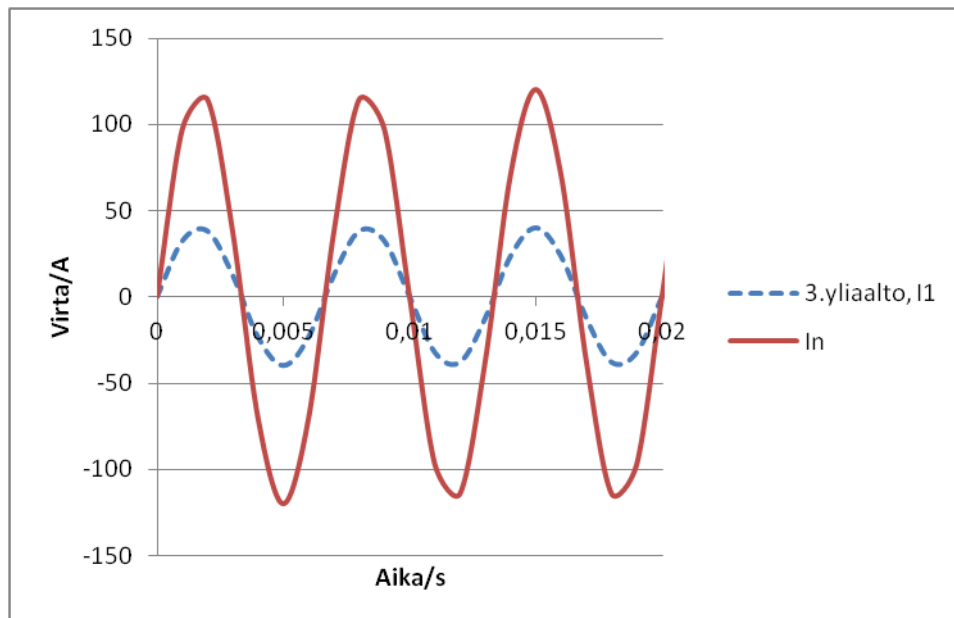


KUVA 5. Kolmas yliaalto 50 Hz verkossa.



KUVA 6. 3.yliaalto on saman vaiheinen jokaisen vaiheen kanssa.

Yllä olevassa kuvassa (kuva 6) esitettyä kolmatta yliaaltoa verrattaessa eri vaiheiden perusaaltoihin huomataan sen olevan samanvaiheinen jokaisessa vaiheessa. Vaiheiden kolmas yliaalto summautuu nollajohdossa aiheuttaen nollajohtimeen kolme kertaa suuremman 150Hz virran kuin vaihejohtimissa (kuva 7), joka voi johtaa erilaisiin ongelmiin. (ABB Control Oy. Kolmannen yliaallon opas, s.8)



KUVA 7. Summautunut 3. yliaalto nollajohtimessa.

Sähköverkossa voi nollajohtimen mitoitus olla puolet vaihejohtimen mitoituksesta, ja näin johtaa sen ylikuumentumiseen ja aiheuttaa tulipalovaaran. Myös tehohäviöt,

voimakkaat magneettikentät ja muut häiriöt verkossa voivat syntyä suuren nollavirran ansiosta. Suuri nollavirta aiheuttaa myös muuntajissa ja kondensaattoreissa ei toivottua tehohäviöin kasvua sekä eliniän lyhenemistä.(ABB Control Oy. Kolmannen yliaallon opas, s.16)

Nollavirran aiheuttamia muita mahdollisia häiriöitä ovat erilaiset häiriöt elektronisissa laitteissa, virhetoiminnot maasulkuhälytyksissä. Myös erilaiset säätölaitteet voivat häiriintyä nollavirran takia. (ABB Control Oy. Kolmannen yliaallon opas, s.17)

3.3.2 Muut parittomat yliaallot

Muita parittomia yliaaltoja on 5. (250 Hz), 7. (350Hz), 11. (550Hz) ja 13. (650Hz) ja niin edelleen. Näitä yliaaltoja synnyttää pääasiassa kolmivaiheiset epälineaariset kuormitukset. Yleisimpiä tällaisia laitteistoja on lueteltu alla.(ABB, Yliaaltosuodatin pienjänniteverkkoon, s.2)

- AC-käytöt
- DC-käytöt
- UPSit
- sähkösuodattimet

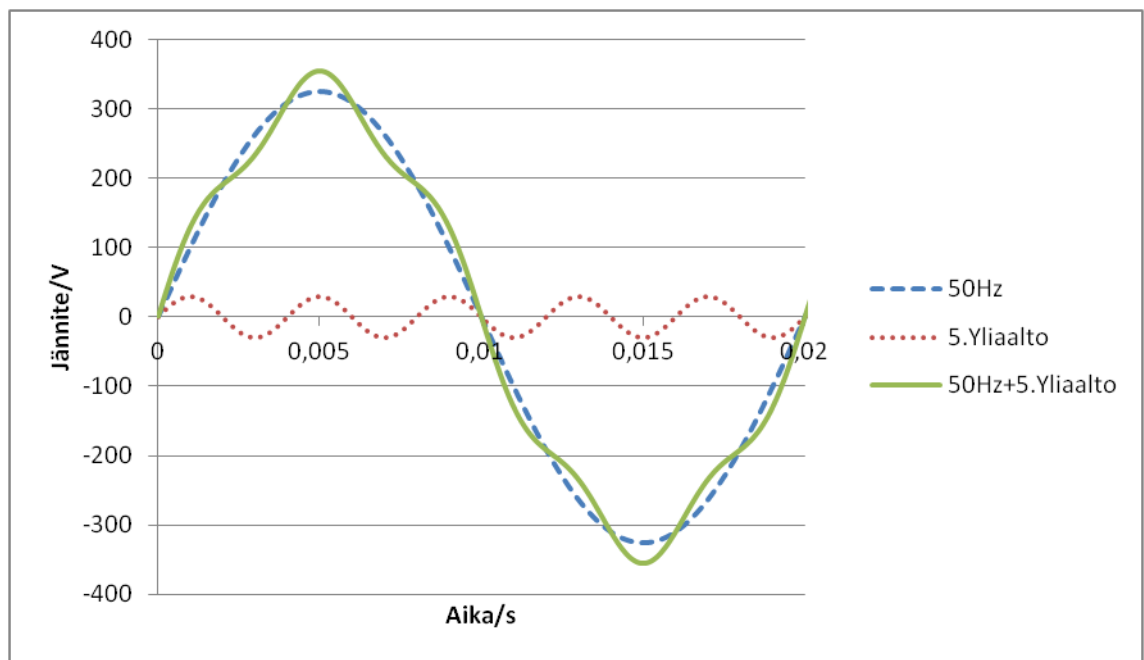
Näiden yliaaltojen haitat voivat näkyä erilaisina häiriöinä tai vaurioina suoja- ja mittalaitteissa sekä ATK- ja automaatiojärjestelmissä. Yliaalloista johtuvat vauriot voivat olla esimerkiksi laitteen ennen aikainen rikkoontuminen, joka voi näyttää hyvin tavanomaiselta vialta ja näin hankaloittaa yliaalto-ongelman havaitsemista.(ABB, Yliaaltosuodatin pienjänniteverkkoon, s.2)

Yksi merkittävimmistä haittavaikutuksista kohdistuu muuntajaan. Yliaallot synnyttävät muuntajan käämityksissä virtalämpöhäviöitä, joka voi johtaa muuntajan ylikuumenemiseen ja näin vaikuttaa muuntajan käyttöikänsä. Yliaaltojen vaikutus näkyy myös oikosulkumoottoreissa. Oikosulkumoottoreiden käämityksissä syntyvät virtalämpöhäviöt kasvavat yliaaltojen vaikutuksesta. Kun moottorin häviöt kasvavat, tarkoittaa se hyötysuhteen alenemista ja mahdollinen ylikuumeneminen eristeiden

vanhenemista ennenaikaisesti.(Korpinen, L., Mikkola, M., Keikko, T., Falck, E., Yliaalto-opus, s.26-27)

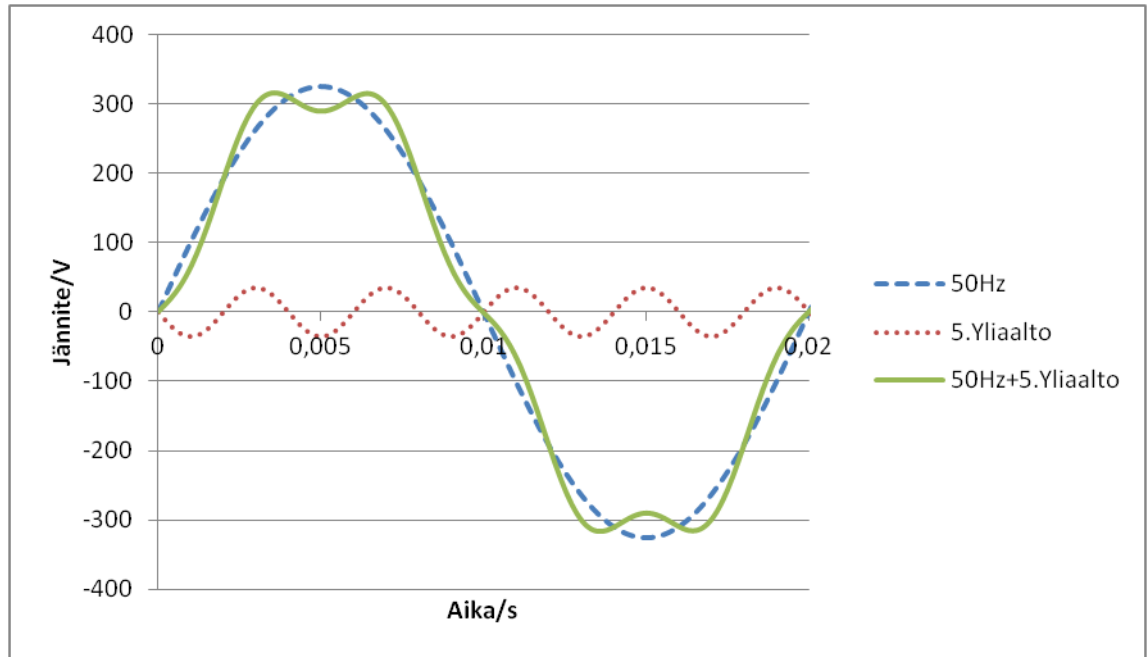
3.4 Yliaaltojen summautuminen perusaaltoon

Yliaallot eivät kulje verkossa erillisinä taajuuksina, vaan kulkevat perusaallon mukana. Mukana kulkeminen tarkoittaa, että se on summautunut perusaallon kanssa, joka näkyy perusaallon säröytymisenä oman voimakkuutensa verran. Alla olevassa kuvassa (kuva 8) on havainnollistettu tilannetta, jossa on perusaalto ja sen viides yliaalto. Perusaaltoa kuvaa katkoviiva, joka on muodoltaan puhdas siniaalto. Viidettä yliaaltoa kuvataan pisteviivalla, jonka voimakkuus on noin kymmenesosa perusaallosta. Yhdistettäessä perusaalto ja sen viides yliaalto, saadaan ehyellä viivalla esitetty summautunut käyrä, kun vaihe-erokulmat ovat samat.



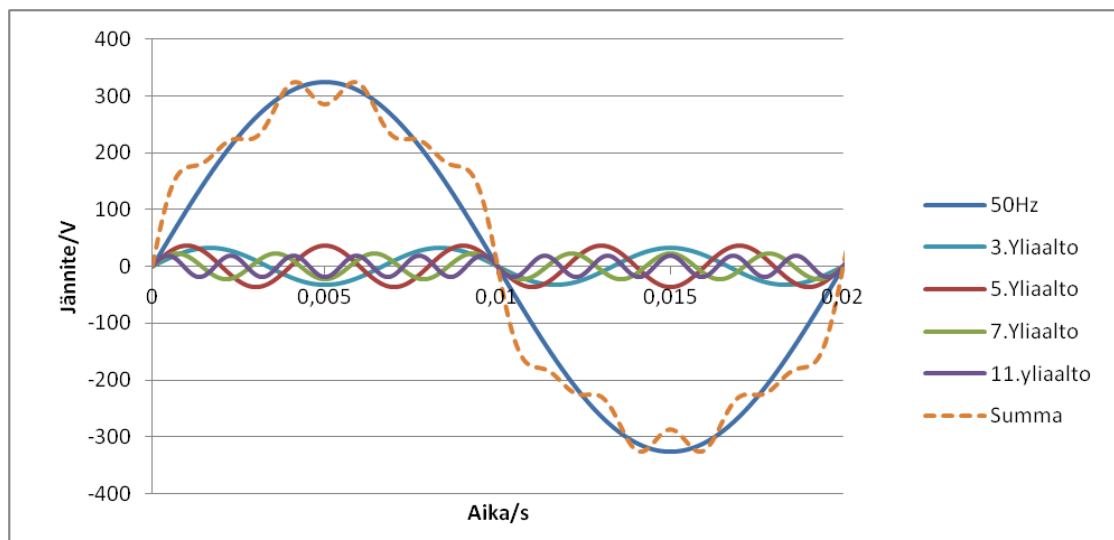
KUVA 8. Yliaallon summautuminen perusaaltoon.

Summautuneesta käyrästä huomataan nousunopeuden kasvaminen sekä puolijakson huipun kohoaminen. Summautunut käyrä muuttuu, jos yliaallon ja perusaallon vaihe-erokulma on 180 astetta (kuva 9). Tällaisessa tilanteessa perusaallon huippu painatuu ja sen rinnalle muodostuu kaksi pienempää huippua. Alla on esitetty esimerkki edellämainitusta tilanteesta.



KUVA 9. Viidennen yliaallon ja 50Hz perusaallon summautuminen, kun vaihe-erokulma on 180 astetta

Jos verkossa esiintyy enemmän yliaaltoja, vaikuttaa jokainen yliaalto osaltaan perusaallon muotoon ja summautunut käyrä poikkeaa enemmän perusaallosta. Alla esitetty useamman yliaallon summautuminen perusaaltoon.



KUVA 10. Säröytynyt jännite. 50Hz jännitteeseen on summautunut on kolmatta, viidettä, seitsemättä ja 11. yliaaltoja.

Yliaaltojen vaikutus näkyy perusaallossa selvästi. Aikaisemmin mainitulla Fourier:n kaavalla (kaava 4) voidaan määrittää jokaisen yliaallon osuus perusaallosta. Kun

vaikuttavia yliaaltoja on enemmän, ilmoitetaan yhteisvaikutus THD-F:n(harmoninen särö suhteessa perusaaltoon) tai THD-R:n(harmoninen särö suhteessa tehollisarvoon). Tämä arvo kertoo säröjen yhteisvaikutuksen perusaaltoon tai tehollisarvoon. THD-F ja THD-R arvot voidaan laskea seuraavasti (kaavat 5 ja 6): (Hietalahti, L., Verkon yliaaltoanalyysi)

$$THD - F = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 \dots U_n^2}}{U_{1v}} \cdot 100\% \quad (5)$$

$$THD - R = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots U_n^2}} \cdot 100\% \quad (6)$$

,jossa

U_1 =vaihejännite, perusaalto

U_n =vaikuttavat yliaallot

3.5 Yliaaltojen vaikutus johtimien mitoittamiseen

Johtimen mitoituksessa on otettava huomioon useita eri asioita. Näitä asioita on lueteltu alla:(Harsia, P., Hietalahti, L., Johtimen mitoitus ja yliaallot)

- kuormitusvirta
- johtojärjestelmän valinta
- eristemateriaali
- kytkentä
- asennustapa
- ympäristöolosuhteet
- yliaallot

SFS 6000-5-52E liitteessä annetaan ohjeet millä tavoin harmonisten yliaaltojen vaikutukset otetaan huomioon kolmivaiheisen järjestelmän johtimia mitoittaessa. Liitteessä käsitellään tilannetta, jossa nollajohtimessa kulkee huomattava nollavirta (ks. kohta 3.3.1), vaikka kuormitus eri vaiheiden välillä on suhteellisen symmetrinen. Tämä johtuu tyypillisesti 3.yliaallosta ja muista kolmella jaollisista yliaalloista. Tällä on

huomattava vaikutus piirin kaapeleiden kuormitettavuuksiin, koska nollajohdon virta voi ylittää vaihejohtimen käyttötaajuuden virran.(Harsia, P., Hietalahti, L., Johtimen mitoitus ja yliaallot)

Standardin taulukossa E.52-1(taulukko 2) esitetään korjauskertoimet kaapeleille, joissa nollajohdin kulkee neli-tai viisijohtimisen kaapelin vaipan sisäpuolella ja nollajohtimen materiaali ja poikkipinta on samat kuin vaihejohtimilla. Korjauskertoimet on esitetty alla:(Harsia, P., Hietalahti, L., Johtimen mitoitus ja yliaallot)

TAULUKKO 2. Yliaalloista johtuvat korjauskertoimet neli- ja viisijohdinkaapeleille (SFS 6000-5-52 liite E)

Kolmannen yliaallon osuus vaihevirrasta %	Korjauskerroin	
	Mitoitus tehdään vaihevirran perusteella	Mitoitus tehdään nollavirran perusteella
0...15	1	-
15...33	0,86	-
33...45	-	0,86
45<	-	1

Kun tunnetaan kolmannen yliaallon osuus vaihevirrasta, tulee kaapeli mitoittaa edellisen taulukon avulla. Prosenttiosuus saadaan verrattaessa kolmannen yliaallon tehollisarvon suhdetta kokonaisvirran tehollisarvoon. Kolmannen yliaallon osuuden kasvaessa yli 33% on mitoitus tehtävä nollajohtimen virran perusteella. Mitoittavan virran perusteella valitaan oikea kaapelikoko standardin esittämän taulukon B.52-2 perusteella (taulukko 3).(Harsia, P., Hietalahti, L., Johtimen mitoitus ja yliaallot)

TAULUKKO 3. Standardin taulukko B.52-2. Kuormitettavuudet ampeereina eri asennustavoilla(SFS 6000-5-52 liite B)

Johtimen nimellinen poikkipinta mm ²	Taulukon B.52.1 mukainen referenssiasennustapa						
	A		B		C		D
	kolme kuormitettua johdinta	kaksi kuormitettua johdinta	kolme kuormitettua johdinta	kaksi kuormitettua johdinta	kolme kuormitettua johdinta	kaksi kuormitettua johdinta	kolme kuormitettua johdinta
1	2	3	4	5	6	7	8
kupari							
1,5	14	15	16	17,5	18,5	20	26
2,5	19	20	21	24	25	29	35
4	24	27	29	32	34	38	46
6	31	34	36	40	43	49	57
10	41	46	49	55	60	67	77
16	55	60	66	73	80	90	100

Alla esitetään esimerkki laskelmia, joissa kaapeli mitoitetaan yllä olevan taulukon mukaan (taulukko 1). (Harsia, P., Hietalahti, L., Johtimen mitoitus ja yliaallot)

Esimerkki tilanteessa on symmetrinen 3-vaiheinen kuormitus ja vaihevirran tehollisarvo $I_{L,rms} = 13 \text{ A}$

Esimerkki 1.

Kolmannen yliaallon osuus 16%

Yhden vaiheen kolmannen yliaallon osuus ampeereina

$$I_{150} = I_{L,rms} \cdot I_{150\%} = 13 \text{ A} \cdot 0,16 = 2,08 \text{ A}$$

Nollajohtimessa kulkeva virta

$$I_n = 3 \cdot I_{150} = 3 \cdot 2,08 \text{ A} = 6,24 \text{ A}$$

Koska kolmannen yliaallon osuus on alle 33%, mitoitetaan kaapeli vaihevirran perusteella. Vaihevirraksi $I_{L,rms}$ oli ilmoitettu 13 ampeeria, tähän on huomioitava taulukossa 1 oleva korjauskerroin, jolloin johtimen mitoittavaksi virraksi muodostuu:

$$I_m = \frac{I_{L,rms}}{k} = \frac{13 \text{ A}}{0,86} = 15,116.. \text{ A} \approx 15 \text{ A}$$

Asennustavan ollessa A ja mitoittavan virran ollessa 15 A, tulee johtimen poikkipinta olla taulukon 2 perusteella $2,5 \text{ mm}^2$.

Esimerkki 2.

Kolmannen yliaallon osuus 36%

Yhden vaiheen kolmannen yliaallon osuus ampeereina

$$I_{150} = I_{L,rms} \cdot I_{150\%} = 13 \text{ A} \cdot 0,36 = 4,68 \text{ A}$$

Nollajohtimessa kulkeva virta

$$I_n = 3 \cdot I_{150} = 3 \cdot 4,68 \text{ A} = 14,04 \text{ A}$$

Koska kolmannen yliaallon osuus on yli 33%, mitoitetään kaapeli nollajohtimen virran perusteella. Nollajohtimen virtaan on otettava huomioon vielä taulukossa 1 esitetty korjauskerroin 0,86, jolloin mitoittavaksi virraksi muodostuu:

$$I_m = \frac{I_n}{k} = \frac{14,04 \text{ A}}{0,86} = 16,325.. \text{ A} \approx 16 \text{ A}$$

Asennustavan ollessa A ja mitoittavan virran ollessa 16 A, tulee johtimen poikkipinta olla taulukon 2 perusteella 2,5mm².

Esimerkkien avulla huomataan millä tavoin yliaaltojen huomioiminen vaikuttaa kaapelin mitoitukseen. Jos kolmannen yliaallon vaikutusta ei oltaisi otettu huomioon tai sen osuus olisi hyvin pieni (<15%), olisi 13 A vaihevirralla voitu käyttää 1,5mm² johtimilla varustettua kaapelia. Jos kolmannen yliaallon osuus kasvaa suuremmaksi(>15%) vaikuttaa se mitoittavan virran arvoon. Kuten esimerkeissä huomattiin, niin suurempi kolmannen yliaallon osuus kasvatti vaadittavaa johdinkokoa.

4 SUOTIMET

Välttyäksemme sähköverkkoon syntyneiden yliaaltojen häiriöltä ja niiden haittavaikutuksilta on harmonisille yliaalloille kehitetty omat suotimet. Suotimia on pääasiassa kahta eri tyyppiä, joko passiivisuodin tai aktiivisuodin. Suotimet mitoitetaan jokaiseen käyttökohteeseen erikseen. Suotimet toimivat niinsanottuna imupiirinä, joka suodattaa verkon yliaaltovirrat ja alentaa jännitesärön halutulle tasolle. Yliaaltoja ei pystytä kuitenkaan täydellisesti poistamaan verkosta. (ABB, Yliaaltosuodatin pienjänniteverkkoon, s.2)

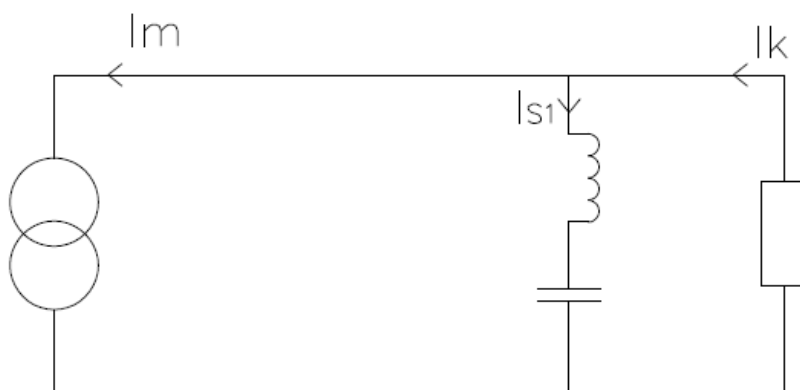
4.1 Passiivisuotimet

Hinnaltaan passiivisuodin on varsin edullinen verrattuna aktiivisuotimeen. Hintaan vaikuttaa sen varsin yksinkertainen rakenne joka koostuu pääosin kondensaattoriyksiköstä ja kuristimesta. Passiivisuodinta mitoitettaessa otetaan huomioon haluttu kondensaattoreiden kompensointiteho ja kuristimen induktanssi siten, että sen impedanssi on halutulla yliaaltotaajuudella hyvin pieni. Passiivisuodin mitoitetaan aina tietyille taajuuksille. Sen käyttö soveltuu erinomaisesti silloin kun kuorman suuruus pysyy samana. (ABB, Yliaaltosuodatin pienjänniteverkkoon, s.3)

4.1.1 Yhdelle taajuudelle viritetty passiivisuodin

Passiivisuodin voidaan siis viritellä toimimaan yhdelle tai useammalle taajuudelle. Yhdelle taajuudelle viritettyä suodinta tulisi käyttää mahdollisimman pieneen yliaaltokomponenttiin, koska viritetyn taajuuden alapuolella yliaallot saattavat vahvistua kun taas yläpuolella vaimentua. (ABB, Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas, s.24)

Seuraavassa kuvassa (kuva 11) on havainnollistettu suotimen kytkentä. Kuvassa esitetään muuntajan läpikulkeva virta I_m , suotimen läpi kulkeva virta I_s ja kuorman kautta kulkeva virta I_k .



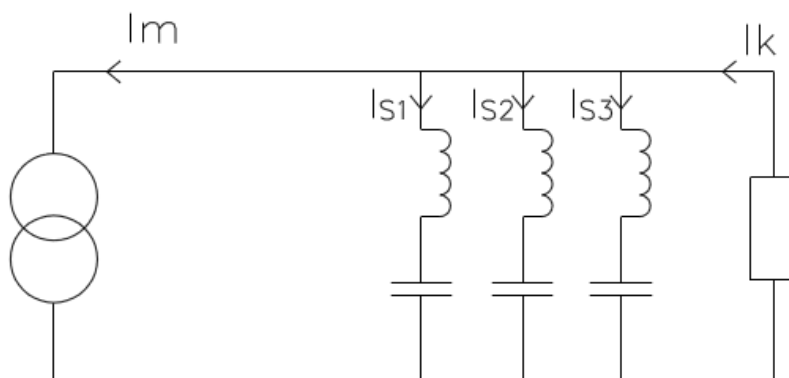
KUVA 11. Yhdelle taajuudelle viritetty passiivisuodin

Yllä olevassa kuvassa (kuva 11) kuorman synnyttämät yliaallot kulkevat virran I_k mukana kohti muuntajaa. Suodin on viritetty kuorman aiheuttamalle merkittävimmälle yliaaltotaajuudelle. Suotimella on matala impedanssi juuri kyseisellä yliaaltotaajuudella, jolloin merkittävin yliaalto kulkee suotimen läpi, eikä pääse kulkemaan muuntajan kautta. On huomioitava, että suodin ei saa poistettua yliaaltoja kokonaan, vaan ne suodatetaan halutulle tasolle. Halutun yliaaltokomponentin määrää voidaan kuitenkin laskea merkittävästi.

4.1.2 Monelle taajuudelle viritetty passiivisuodin

Monelle taajuudelle viritetty passiivisuodin suodattaa kahta tai useampaa harmonista yliaaltoa. Suodin koostuu useammasta haarasta, kun taas yhden taajuuden suodin koostuu yhdestä haarasta. Jokainen haara koostuu kuristimen ja kondensaattorin rinnankytkennästä (kuva 12). (ABB, Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas, s.24)

Koska pienempiä yliaaltokomponentteja esiintyy yleensä eniten, voidaan monelle taajuudelle viritetyllä passiivisuotimella esimerkiksi suodattaa samanaikaisesti kolme pienintä yliaaltokomponenttia. Tällöin ne saadaan poistettua kerralla lähes kokonaan ja saavutetaan parempi suodatustulos kuin yhdelle taajuudelle viritetyllä passiivisuodattimella.

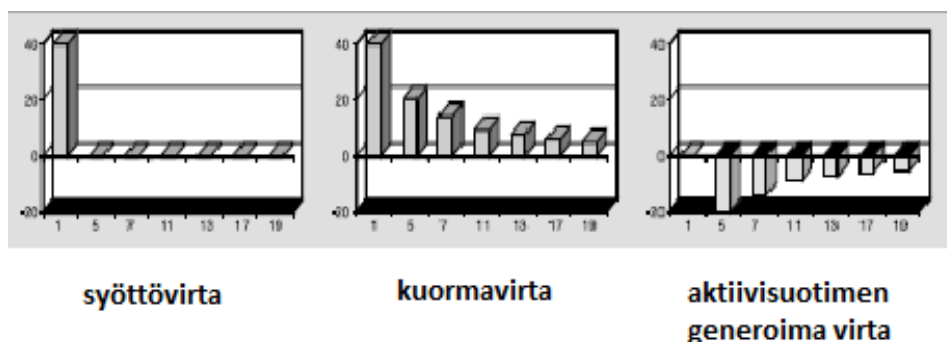


KUVA 12. Monelle taajuudelle viritetty passiivisuodin

Yllä olevassa kuvassa (kuva 12) kuorman synnyttämät yliaallot kulkevat virran I_k mukana kohti muuntajaa. Tässä tapauksessa suodin on viritetty useammalle taajuudelle. Yliaallot joille suodin on viritetty kulkevat suotimien läpi, eivätkä pääse muuntajalle. Ja näin muuntaja läpi kulkeva virta I_m on puhtaampaa. On huomioitava, että suodin ei saa poistettua yliaaltoja kokonaan, vaan ne suodatetaan halutulle tasolle. Haluttujen yliaaltokomponenttien määrää voidaan kuitenkin laskea merkittävästi.

4.2 Aktiivisuodin

Toinen vaihtoehto passiivisuotimelle on aktiivisuodin. Aktiivisuodin eroaa passiivisuotimesta siinä, että passiivisuodin viritetään halutuille tietyille yliaaltokomponenteille, kun taas aktiivisuodin kompensoi verkossa ilmenevät yliaallot synnyttämällä samat verkon yliaaltokomponentit vastakkaisvaiheisina. Aktiivisuodin pystyy säätämään tuotettavaa yliaaltosärön määrää millä tahansa ajan hetkellä. (ABB, Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas, s.25)



KUVA 13. Aktiivisuotimen toiminta. (Kuva: ABB, Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas, s.25)

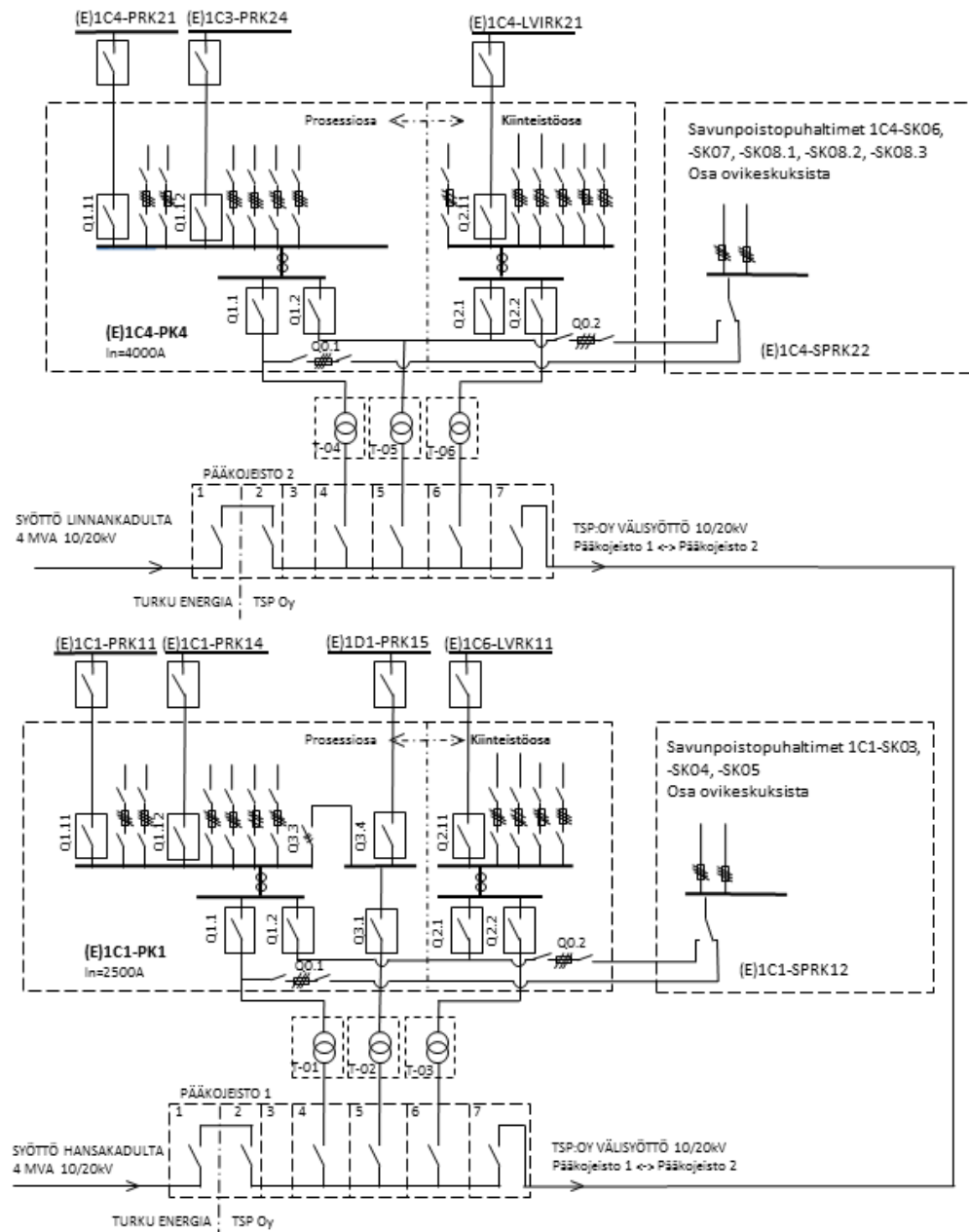
Edellisessä kuvassa (kuva 13) on kuvattu aktiivisuotimen toimintaa, jossa verkossa kulkeva virta on jaettu komponentteihin. Kuormanvirran pylväsdiagrammista huomaamme kuorman synnyttävän yliaaltoja verkkoon. Aktiivisuodin kompensoi nämä yliaallot kehittämällä vastakkaisvaiheiset yliaaltokomponentit jolloin jää jäljelle pelkästään perusaalto, joka on kuvassa ensimmäisenä.

Koska aktiivisuodin pystyy itse säätämään tuotettavaa yliaaltosäröä, on sen käytettävyys suhteellisen laaja. Näin ollen parhaat käyttökohteet ovat erilaiset pienet ryhmäkäytöt, joissa kuormitus ei ole vakio. Hinnaltaan aktiivisuotimet ovat varsin kalliita, jolloin suurien käyttökohteiden hinta kasvaa jo melkoisesti.(ABB, Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas, s.25)

5 MITTAUKSET

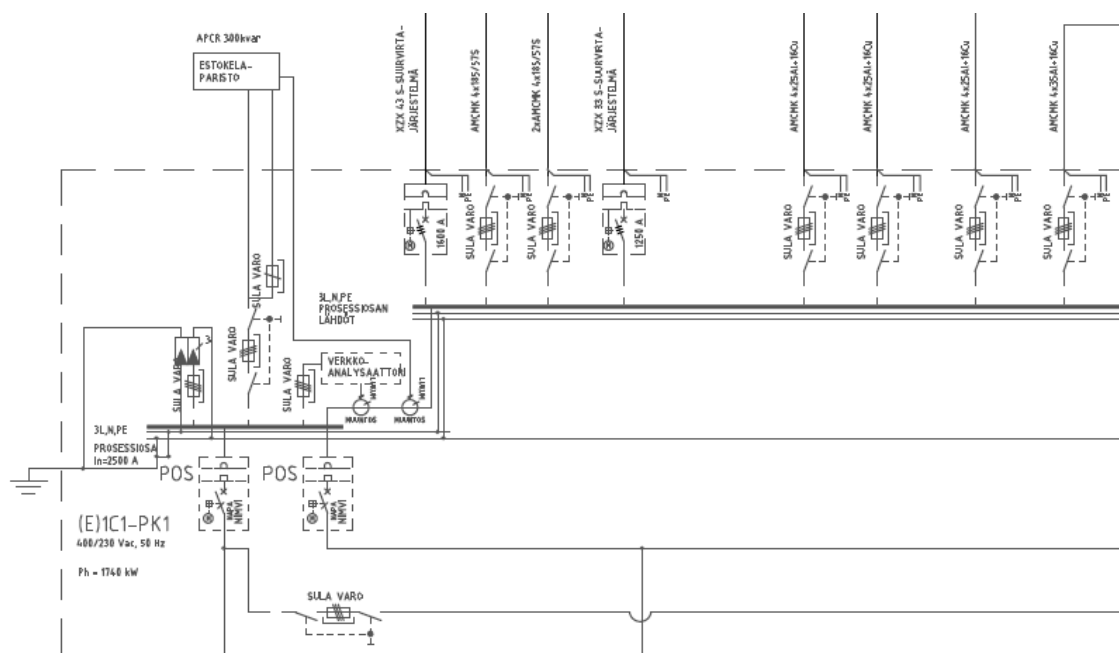
5.1 Mitattavat kohteet

Mittauskohteena oli Turun seudun puhdistamo Oy (TSP). TSP:n sähkönjakelu on jaettu pääosin kahteen osaan, etu- ja takaosaan. Sähkö toimitetaan laitoksen etuosalle 10 kV liittymällä. Laitoksen takaosalle on tehty 10 kV varaliittymä. Normaalitilanteessa laitoksen takaosalle toimitetaan sähkö etu- ja takaosan välisellä välikaapelilla. 10kV:a muunnetaan 400V:ksi erillisillä muuntajilla prosessipuolelle ja kiinteistöpuolelle. Seuraavassa kuvassa (kuva 14) on havainnollistettu koko laitoksen sähkönjakelua. Kuvasta nähdään laitoksen kaksi pääkeskusta, joista toinen (1C1-PK1) sijaitsee laitoksen etuosassa ja toinen (1C4-PK2) sijaitsee laitoksen takaosassa. Kuvaan on merkattu pääkeskusten jakautuminen prosessi- ja kiinteistöosiin.

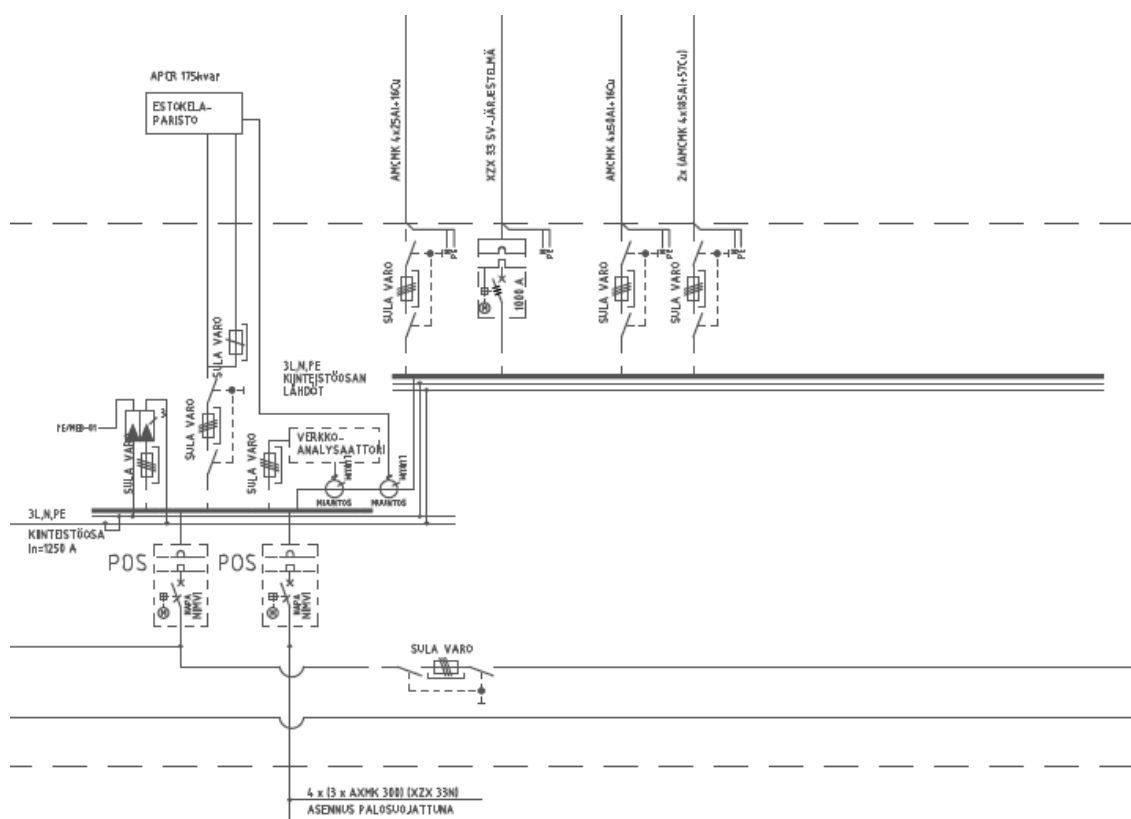


KUVA 14. Yksinkertaistettu sähkönjakelun pääkaavio

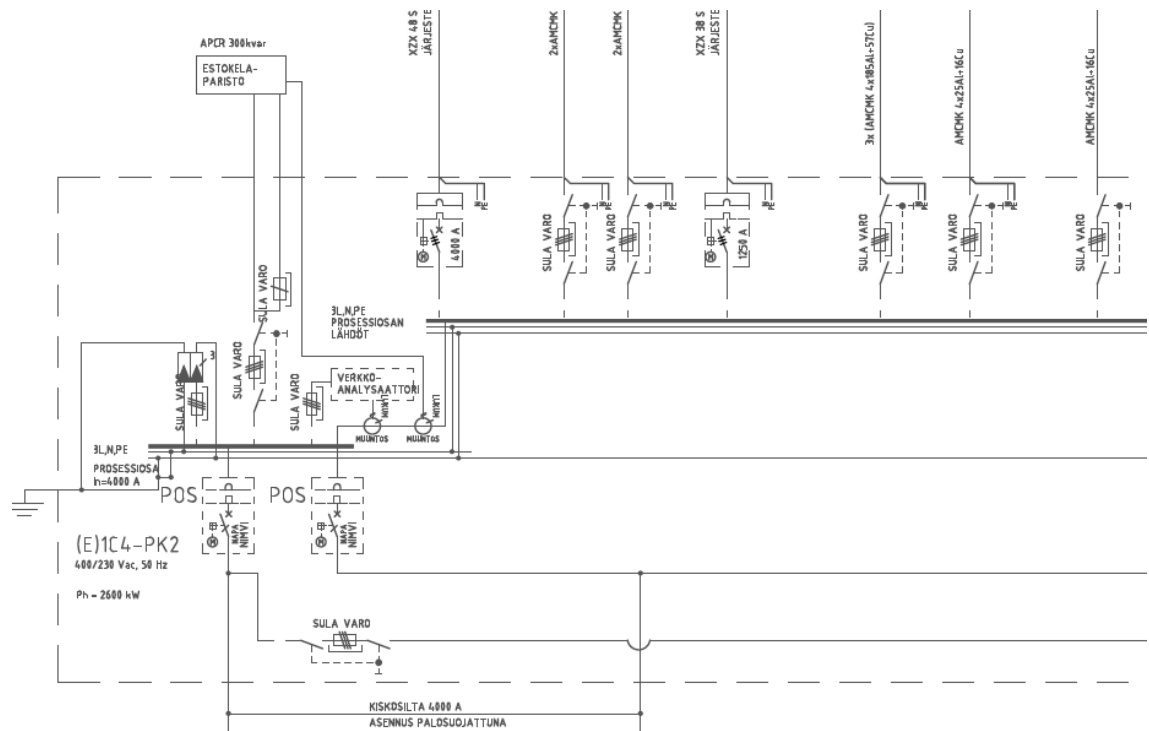
Työn neljä mittauspistettä muodostuivat etuosan 1C1-PK1 –keskuksen prosessipuolesta(kuva 15) ja kiinteistöpuolesta(kuva 16), sekä takaosan 1C4-PK2 –keskuksen prosessipuolesta(kuva 17) ja kiinteistöpuolesta(kuva 18).



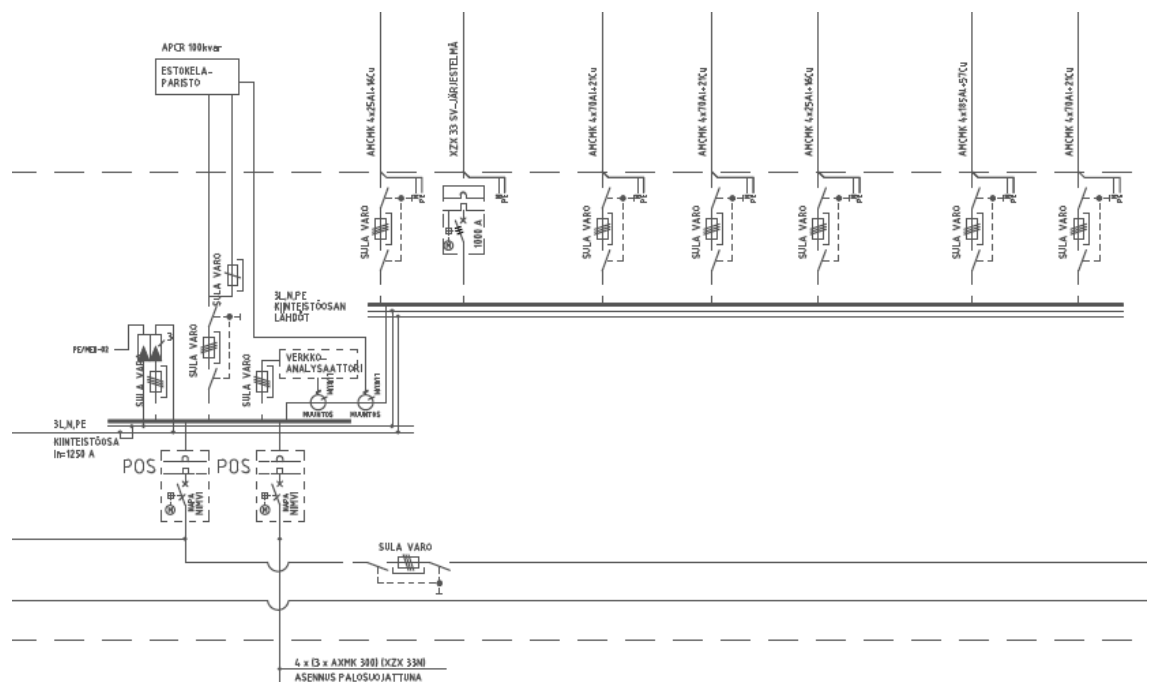
KUVA 15. Etuosan prosessipuolen pääkaavio



KUVA 16. Etuosan kiinteistöpuolen pääkaavio



KUVA 17. Takaosan prosessipuolen pääkaavio

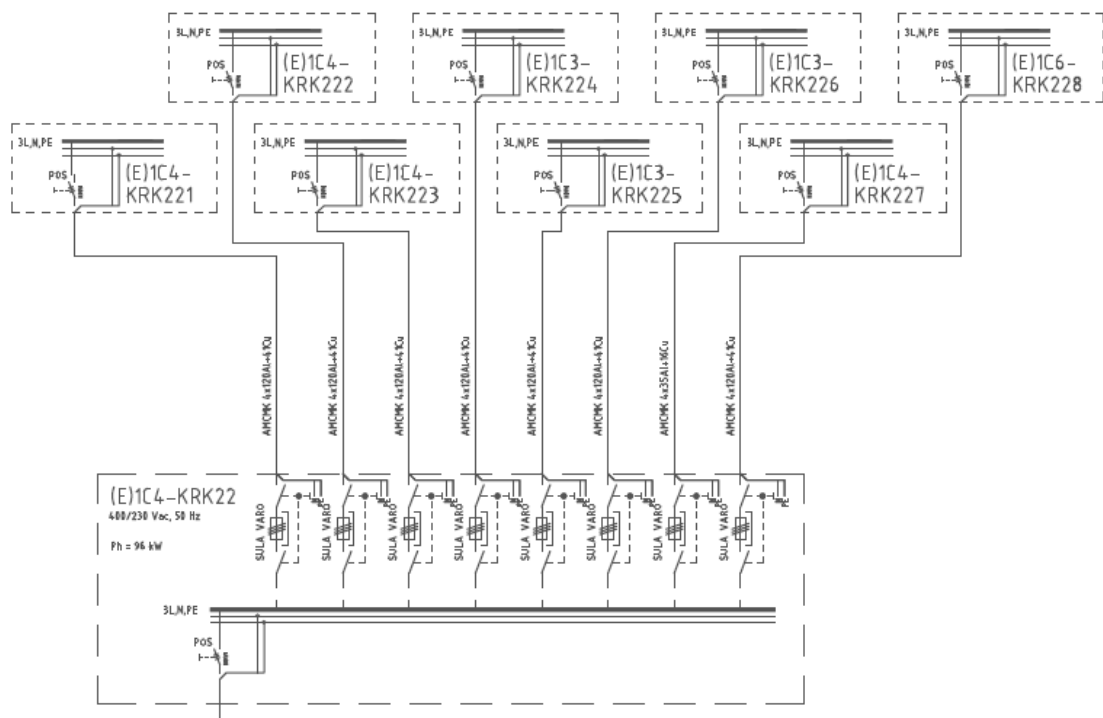


KUVA 18. Takaosan kiinteistöpuolen pääkaavio

Laitoksen pääkeskuksien kiskostot on rakennettu hyvin kosketussuojatuiksi ja niihin on mahdotonta päästä käsiksi työturvallisuutta vaarantamatta tai ilman jännitekatkoja. Mittauksissa käytettiin pääkeskuksissa olevien kiinteiden verkkoanalysaattoreiden virtamuuntajia hyväksi. Tällä menetelmällä pystyimme suorittamaan mittaukset

turvallisesti ja jännitekatkoita. Laitoksen virtamuuntajat on kytketty pelkästään vaihejohtimiin, jonka takia nollajohtimen mittausta jätettiin tekemättä.

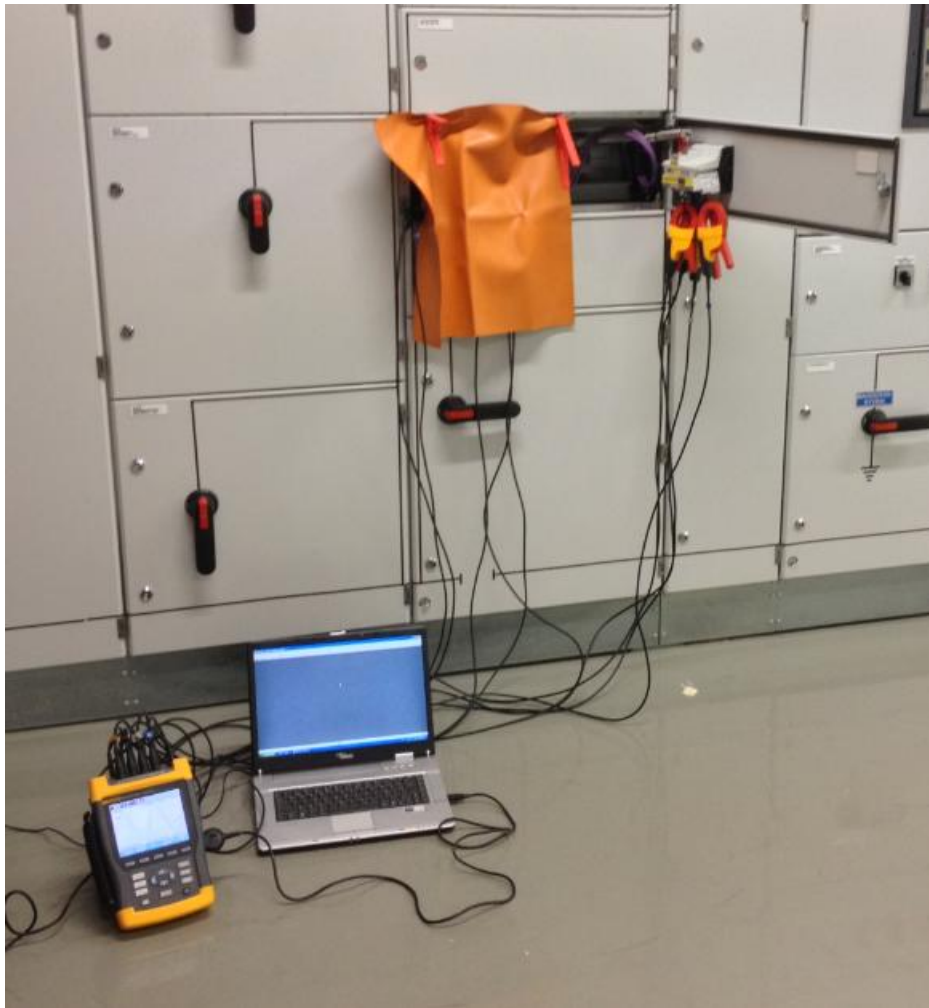
Mittaukset tehtiin myös 1C4-PK2 alakeskukseen 1C4-KRK22 (kuva 19). Tämä keskus ohjaa valaistusta laitoksen takaosassa. Laitoksen valaistus on toteutettu pääosin suurpainenatriumlampuin. Keskukselle haluttiin tehdä mittaukset, koska suurpainenatriumlamppujen tiedetään aiheuttavan jonkin verran kolmatta yliaaltoa ja valaisimien määrä on varsin suuri, noin 400kpl/150W. Mittaus suoritettiin 1C4-KRK22 –keskuksen pääkytkimen kohdalta.



KUVA 19. 1C4-KRK22 keskuksen pääkaavio

5.2 Käytetyt mittausvälineet

Työssä tehdyissä mittauksissa käytettiin Fluke 434 –verkkoanalysaattoria. Verkkoanalysaattoriin kytkettiin tarvittavat mittapäät jännitteen ja virran mittaamista varten. Tiedon tallentamiseen ja käsittelyyn käytettiin tietokonetta.



KUVA 20. Käytetyt mittavälineet

Mittaukset tehtiin jännitteisissä keskuksissa. Jännitteisten osien läheisyydessä noudatettiin sähkötyöturvallisuus standardi SFS 6002 antamia ohjeita. Keskukset sijaitsevat valvotuissa ja lukituissa tiloissa. Läheiset jännitteiset osat suojattiin asianmukaisin suojin.

5.3 Mittaustulokset ja kommentit

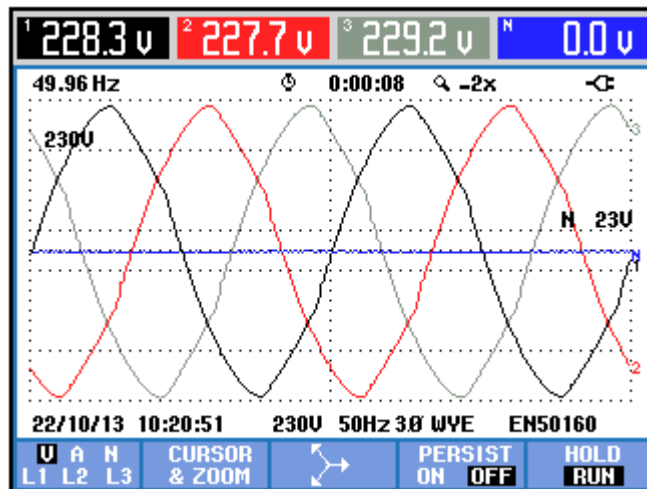
Mittaushetkellä oli laitoksen virtaama oli hieman sen keskiarvoa matalampi, jolloin myös sähköinen kuormitus oli hieman keskiarvoa matalampi. Jokaisesta mittauskohteesta on esitelty vain yhden vaiheen tulokset, tuloksia on analysoitu kokonaisuutena. Kaikki mittaustulokset on esitetty liitteessä 1.

5.3.1 Prosessi- sekä kiinteistöpuoli 1C1-PK1

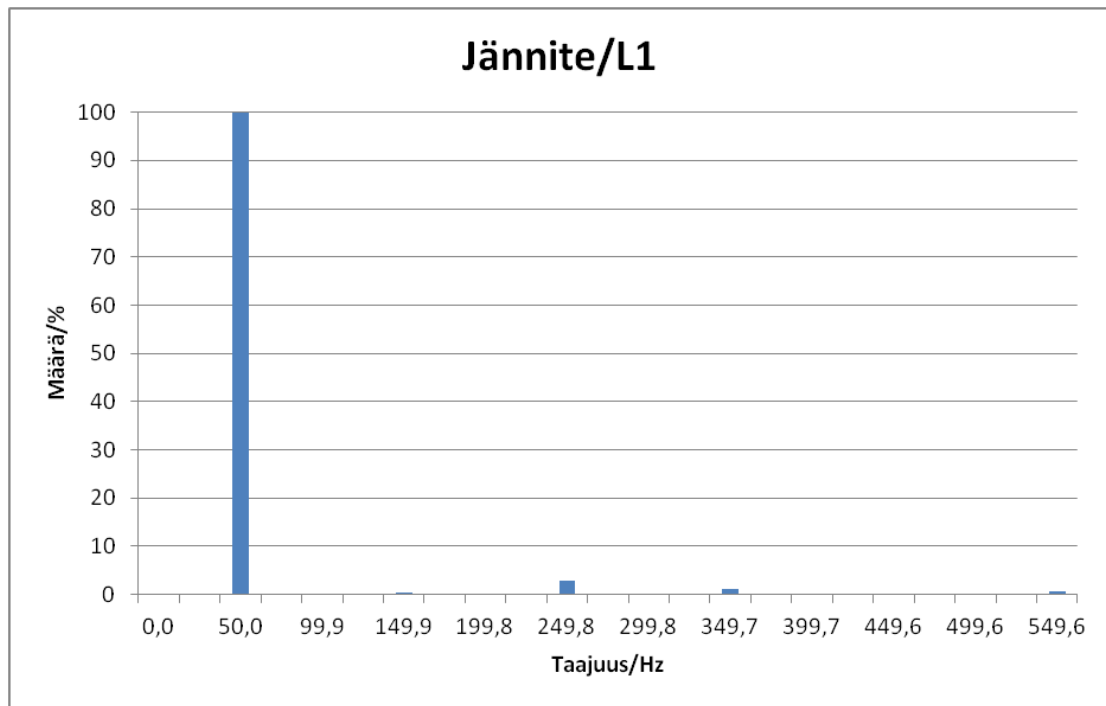
Ensimmäisenä mittauskohteena oli etuosan 1C1-PK1 prosessipuoli. Mittaustulokset esiteltä alla:

Volt/Amps/Hertz				
	L1	L2	L3	N
V _{rms}	227.9	227.6	228.9	0.0
V _{pk}	334.1	336.3	337.8	0.1
CF	1.47	1.48	1.48	OL
Hz	49.96			
	L1	L2	L3	N
A _{rms}	1.1	1.1	1.0	0.0
A _{pk}	1.9	1.9	1.7	0.1
CF	1.71	1.75	1.72	OL
22/10/13 10:21:43 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
TREND				HOLD RUN

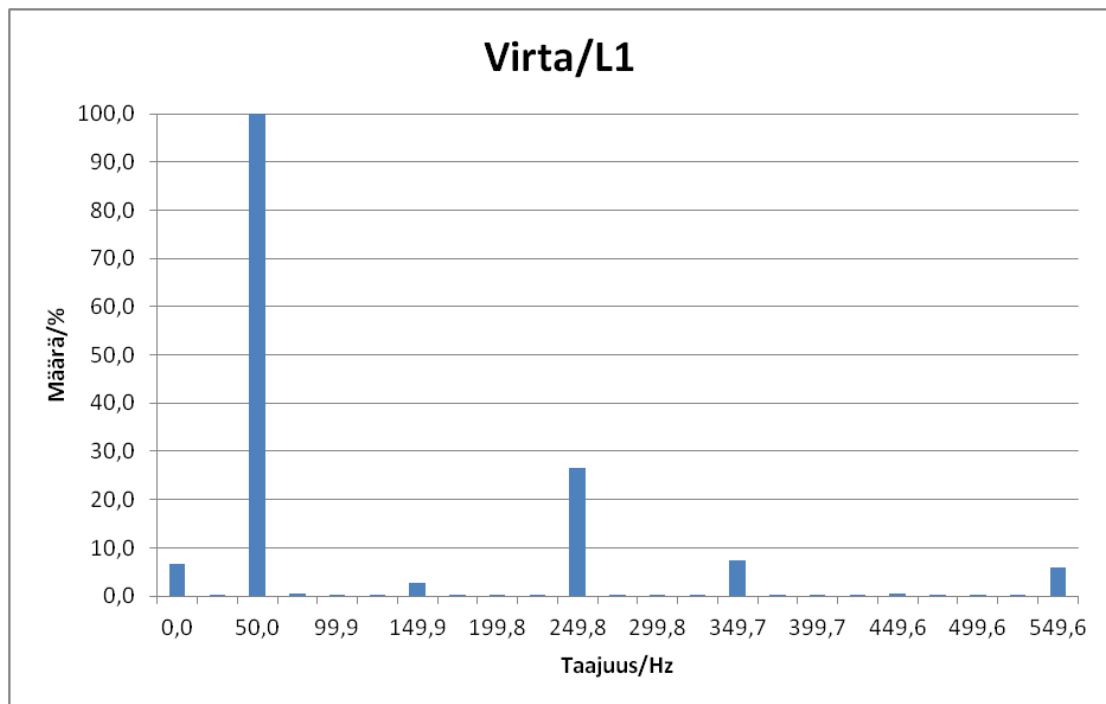
KUVA 21. 1C1-PK1 prosessipuolen virrat ja jännitteet



KUVA 22. Jännitteiden käyrämuodot



KUVA 23. L1 jännitteen viivaspektri, THD-F 3,3 %



KUVA 24. L1 virran viivaspektri, THD-F 28,6 %

Keskuksen kuormitus jakaantuu melko tasaisesti jokaisen vaiheen välille (kuva 21). Virranmittauspiste on virtamuuntajan takana, jonka muuntosuhde on 2500/5 A. Mitattu virran tehollisarvo täytyy redusoida, jotta tiedetään todellinen keskuksessa kulkeva virta. Redusointi tapahtuu kertomalla mitattu I_{rms} virtamuuntajien muuntosuhteella. L1 (I_{1rms}) ja L2 (I_{2rms}) redusoiduksi virran tehollisarvoksi tulee 550 A ja L3 (I_{3rms}) 500 A.

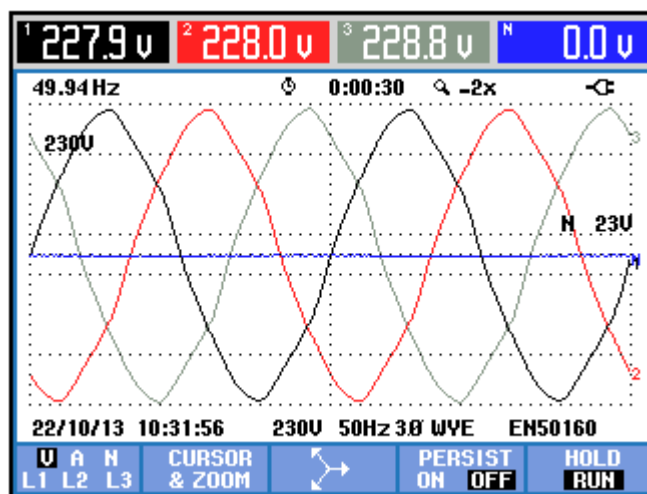
Ensimmäisen vaiheen jännite sisältää 5. yliaaltoja (3 %, kuva 23), aiheuttaen sen käyrämuotoon lievän poikkeaman puhtaaseen siniaaltoon verrattuna (kuva 22). Mittaustuloksista ilmenevä viides yliaalto aiheutuu suurimmaksi osaksi kuormana olevista taajuusmuuttajista.

Vaiheiden osalta voidaan todeta yliaaltojen määrän olevan kunnossa. Korkea virran THD-F arvo säröyttää vähän jännitettä. Jännitteen THD-F arvo pysyy kuitenkin matalana, eikä vaadi toimenpiteitä.

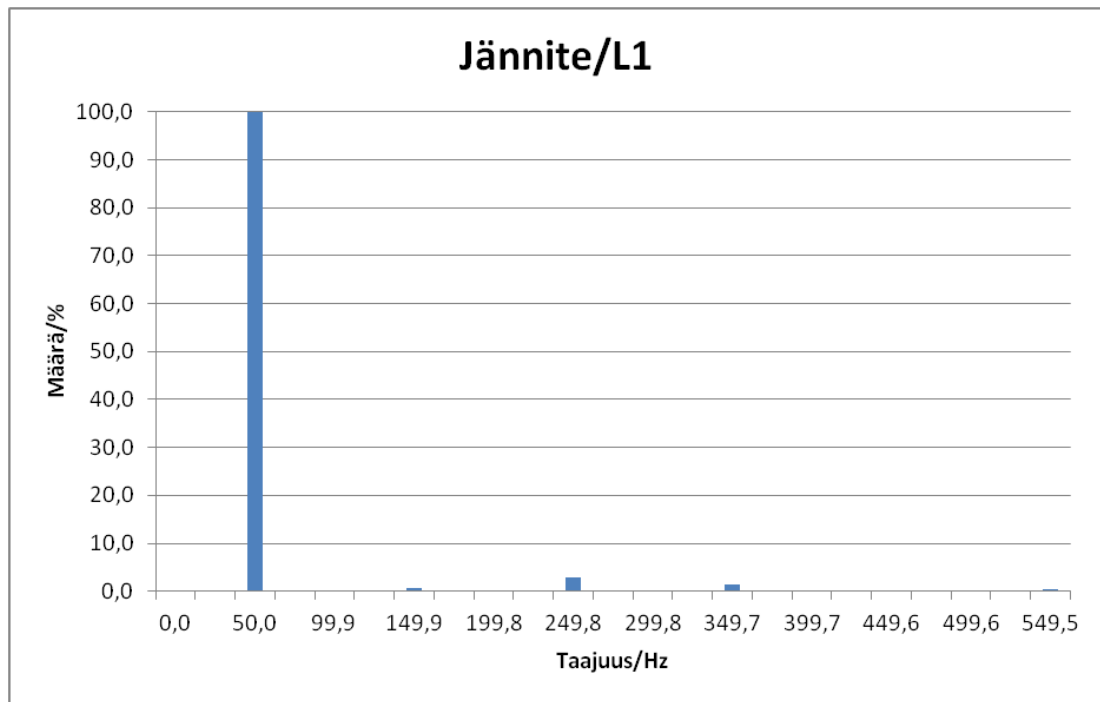
Toisena mittauskohteena oli 1C1-PK1 kiinteistöpuoli. Mittaustulokset on esitelty alla:

Volt/Amps/Hertz				
	0:09:32			
	L1	L2	L3	N
V _{rms}	228.0	228.1	228.9	0.0
V _{pk}	333.2	335.9	337.5	0.1
CF	1.46	1.47	1.47	OL
Hz	49.94			
	L1	L2	L3	N
A _{rms}	1.2	1.2	1.2	0.0
A _{pk}	1.9	1.9	1.9	0.1
CF	1.64	1.64	1.60	OL
22/10/13 10:31:12 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
TREND				HOLD RUN

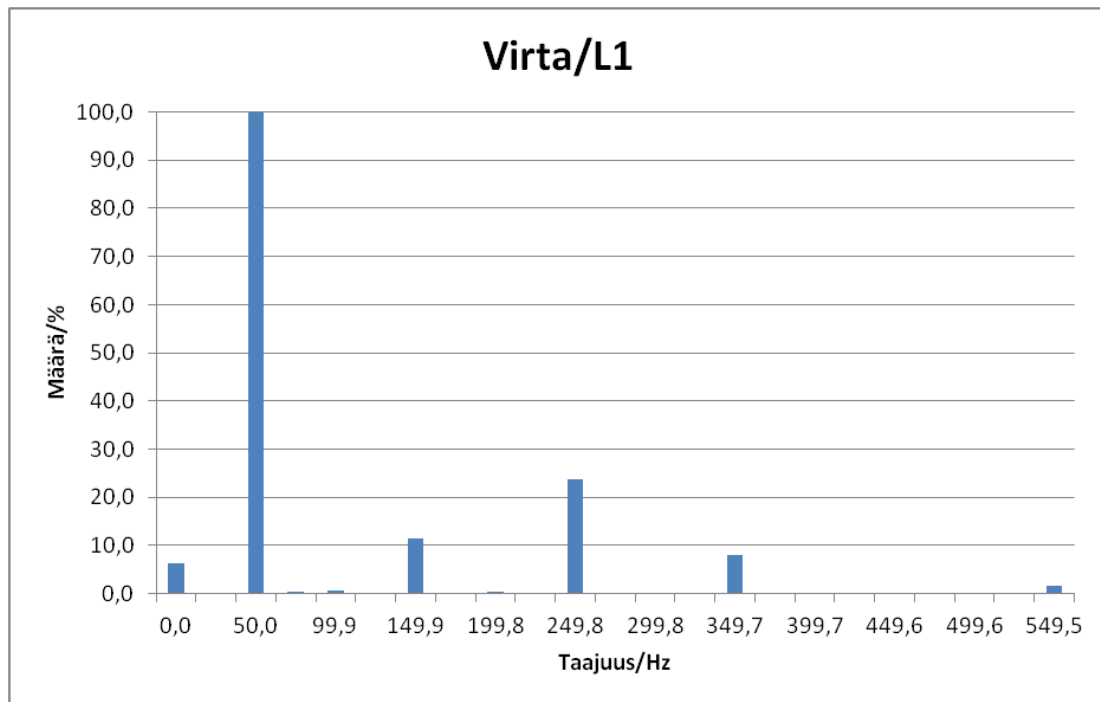
KUVA 25. 1C1-PK1 kiinteistöpuolen virrat ja jännitteet



KUVA 26. Jännitteiden käyrämuodot



KUVA 27. L1 jännitteen viivaspektri, THD-F 3,4 %



KUVA 28. L1 virran viivaspektri, THD-F 27,6 %

Kiinteistöpuolella voidaan helposti ennakoimaan käytettävän kuorman (valaistus yms.) suuruus, jolloin kuorma pystytään jakamaan tasaisesti kaikille vaiheille (kuva 25). Virranmittauspiste on virtamuuntajan takana, jonka muuntosuhte 1250/5 A. Kun mitatut virran arvot (I_{1rms} , I_{2rms} , I_{3rms}) redusoidaan muuntosuhteella, tulee virtojen (I_{1rms}' , I_{2rms}' , I_{3rms}') arvoksi 300 A. L1 jännite sisältää 5.- ja 7.yliaaltoja (kuva 27), kuitenkin

THD-F arvon pysyessä maltillisella 3,4 % tasolla. Yliaallot aiheuttavat käyrämuotoon (kuva 26) lievän särön. L1 virran kokonaissärö THD-F on 27,6 %, joka koostuu 3.-, 5.- ja 7.yliaallosta. Kolmannen yliaallon määrä on noin 11 %, muiden vaiheiden kanssa kertaantuessa on sen voimakkuus paluujohtimessa noin 30 %, aiheuttaen paluujohtimelle noin 90 A virran. Laitoksen valaistuksessa käytettävät purkauslamput aiheuttavat kolmatta yliaaltoa, joka näkyy mittaustuloksissa korkeana arvona (kuva 28).

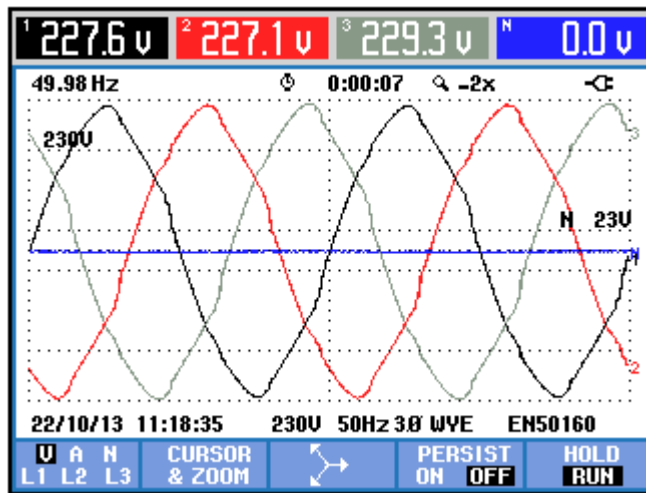
Korkea virran THD-F arvo säröyttää jännitettä vähän. Jännitteen THD-F arvo pysyy alle 4 %:ssa, joka on hyvä, eikä vaadi toimenpiteitä.

5.3.2 Prosessi- sekä kiinteistöpuoli 1C4-PK2

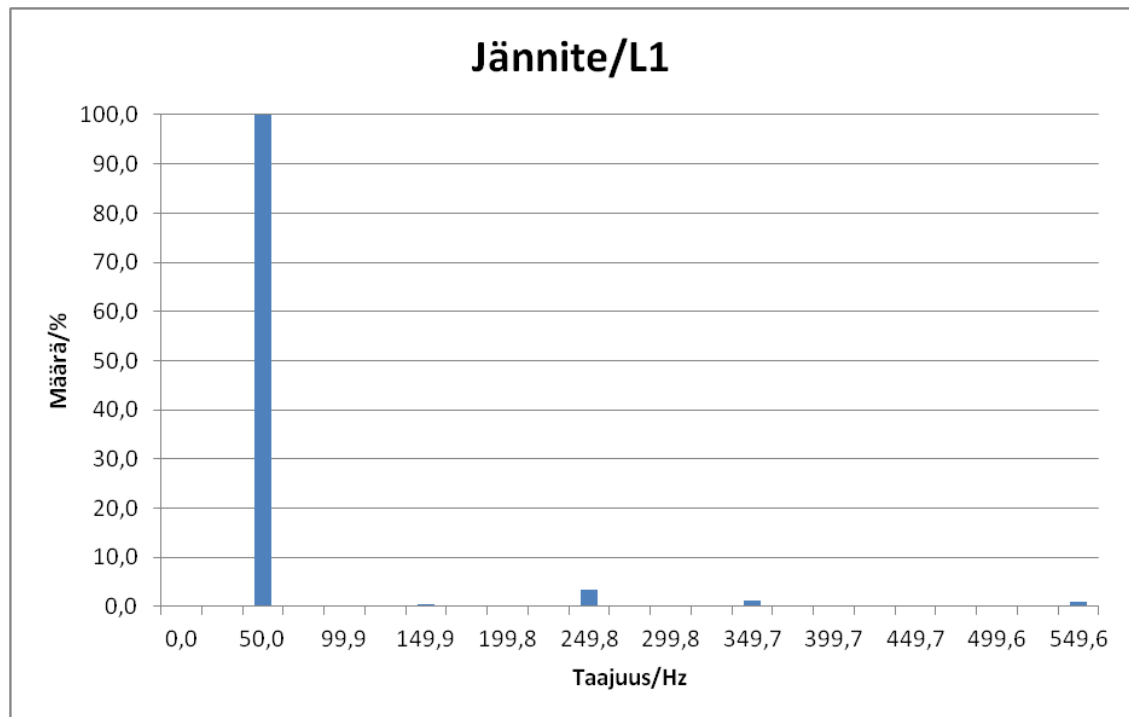
Seuraavana mittauskohteena oli takaosan 1C4-PK2 prosessipuoli. Mittaustulokset esiteltä seuraavassa:

Volt/Amps/Hertz				
	0:03:27			
	L1	L2	L3	N
V _{rms}	227.7	227.2	229.4	0.0
V _{pk}	336.2	338.9	340.3	0.1
CF	1.48	1.49	1.48	OL
Hz	49.96			
	L1	L2	L3	N
A _{rms}	1.9	1.8	1.8	0.0
A _{pk}	3.0	3.0	2.9	0.1
CF	1.60	1.65	1.61	OL
22/10/13 11:18:16 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
TREND				HOLD
				RUN

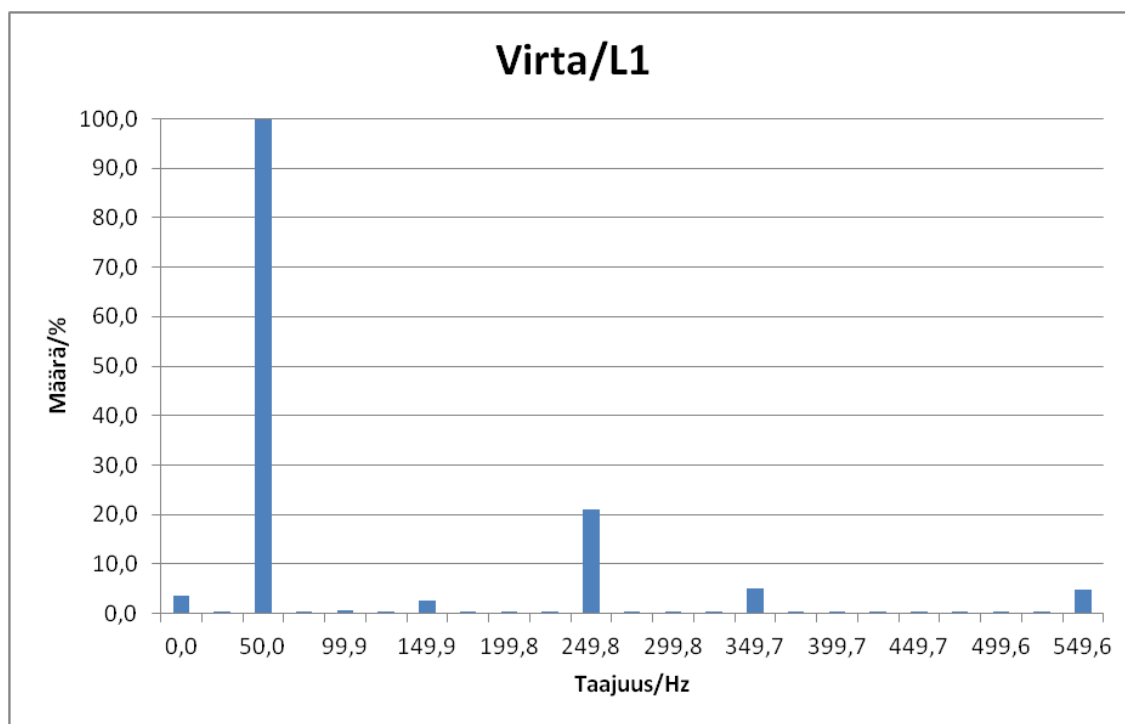
KUVA 29. 1C4-PK2 prosessipuolen virrat ja jännitteet



KUVA 30. Jännitteiden käyrämuodot



KUVA 31. L1 jännitteen viivaspektri, THD-F 4,1 %



KUVA 32. L1 virran viivaspektri, THD-F 22,3 %

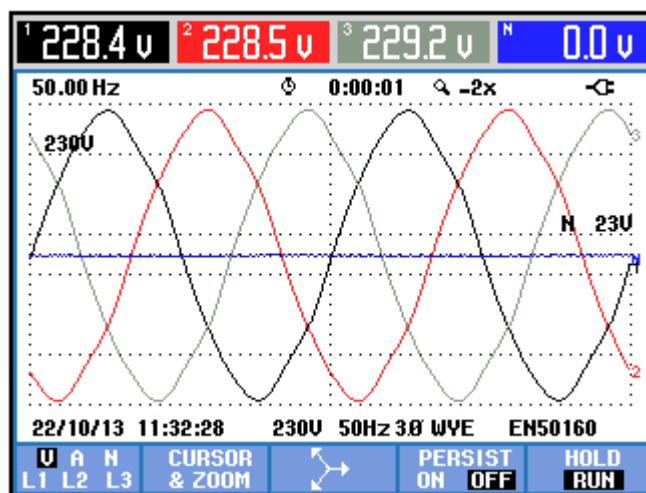
Prosessipuolen kuorma on jaettu melko tasaisesti vaiheiden välille (kuva 29). Redusoitaessa virran tehollisarvot virtamuuntajien muuntosuhteella (4000/5 A) tulee virran I_{1rms} arvoksi 1520 A ja virtojen I_{2rms} ja I_{3rms} arvoksi 1440 A. Keskuksen kuormana on suurimmaksi osaksi erilaisia taajuusmuuttajakäyttöjä, joista aiheutuvat parittomat yliaallot näkyvät mittaustuloksissa (kuvat 31 ja 32).

Jännitteen kokonaissärö (THD-F 4,1%) koostuu 5., 7. ja 11. yliaallosta (kuva 31). THD-F arvon määrä näkyy jännitteen kuvaajien lievänä säröytymisenä (kuva 30). Kokonaissärön suuruus pysyy alle 5%:ssa, eikä sille vaadita toimenpiteitä. Virran kokonaissärön suuruus on 22,3%, joka muodostuu 3., 5., 7. ja 11. yliaallosta.

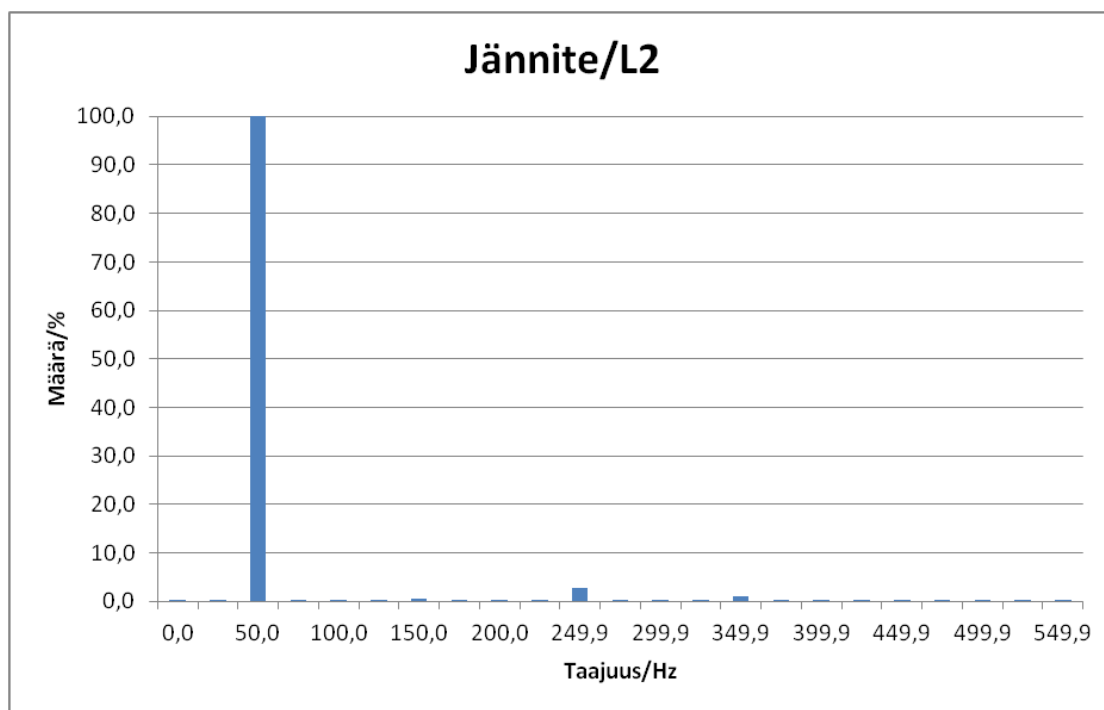
Seuraavana mittauskohteena oli takaosan 1C4-PK2 kiinteistöpuoli. Mittaustulokset esitetty seuraavassa:

Volt/Amps/Hertz				
	0:00:02			
	L1	L2	L3	N
V _{rms}	228.4	228.4	229.1	0.0
V _{pk}	332.8	334.6	335.8	0.1
CF	1.46	1.46	1.47	OL
Hz	49.98			
	L1	L2	L3	N
A _{rms}	0.8	0.8	0.8	0.0
A _{pk}	1.4	1.4	1.5	0.1
CF	1.71	1.83	1.76	OL
22/10/13 11:32:43 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
TREND				HOLD
				RUN

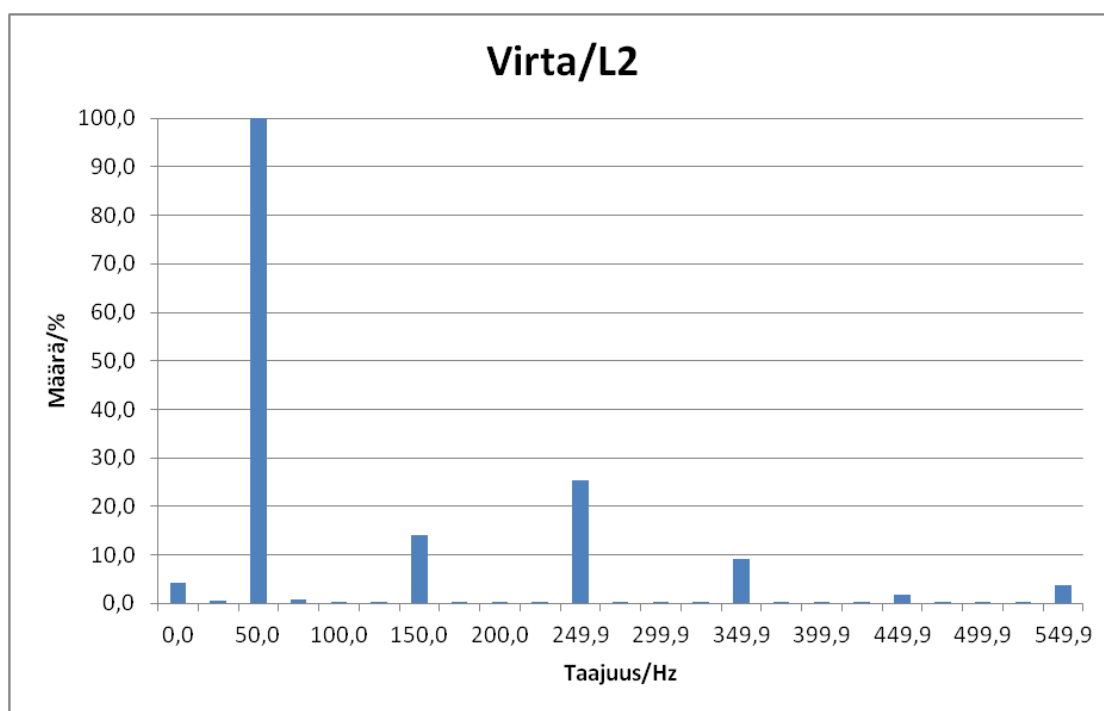
KUVA 33. 1C4-PK2 kiinteistöpuolen virrat ja jännitteet



KUVA 34. Jännitteiden käyrämuodot



KUVA 35. L2 jännitteen viivaspektri, THD-F 2,9 %



KUVA 36. L2 virran viivaspektri, THD-F 30,6 %

Takaosan kiinteistöpuolen kuorma on pystytty jakamaan tasaisesti vaiheiden välille (kuva 33). Redusoitaessa virtojen mittaustulokset (I_{1rms} , I_{2rms} , I_{3rms}) virtamuuntajien muuntosuhteella (1250/5 A) tulee jokaisen vaiheen I_{rms} arvoksi 200 A. Kuormana olevien purkauslamppujen aiheuttama kolmas yliaalto näkyy virran mittaustuloksessa (kuva 36). Muut yliaallot aiheutuu erilaisista puhallin ym. hajanaisista käytöistä.

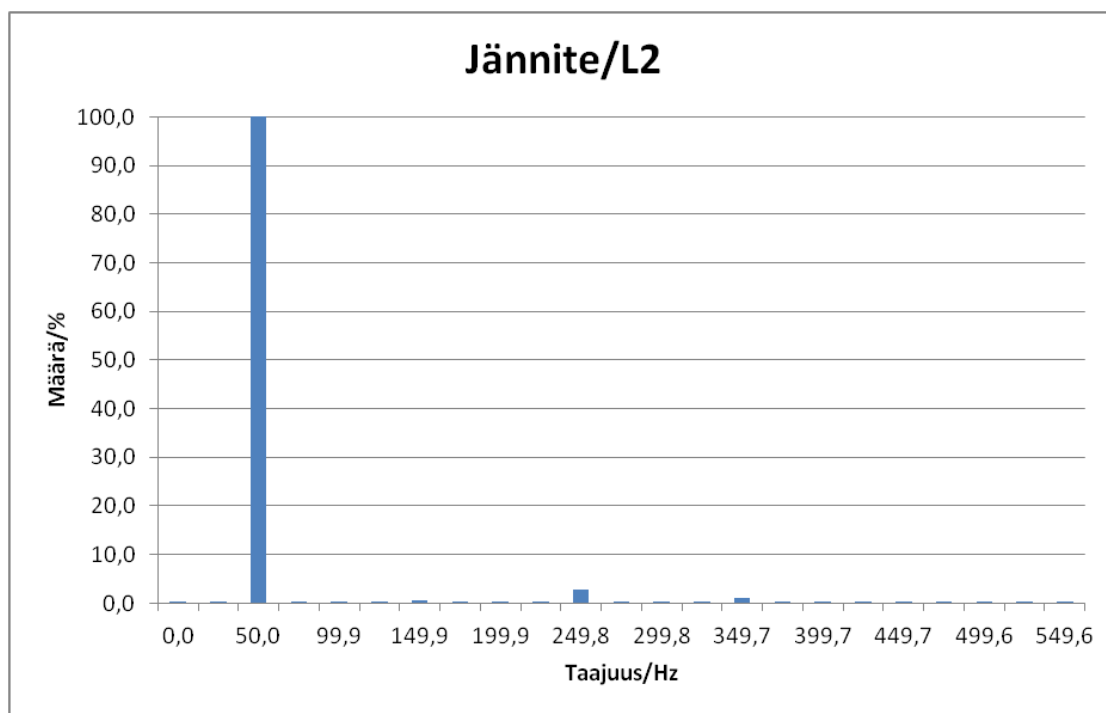
Virran THD-F arvo on 30,6%, joka on kaikista mittaustuloksista korkein. Sen suuruus ei aiheuta toimenpiteitä, koska jännitteen THD-F arvo on vain 2,9%. Virran sisältämän kolmannen yliaallon voimakkuus on noin 13% (26 A), paluujohtimeen kertautuessaan muiden vaiheiden kanssa niiden yhteisvaikutus kasvaa noin 78 A:iin. Jännitteen säröt koostuvat 5. ja 7. yliaallosta.

5.3.3 Valaistuskeskus 1C4-KRK22

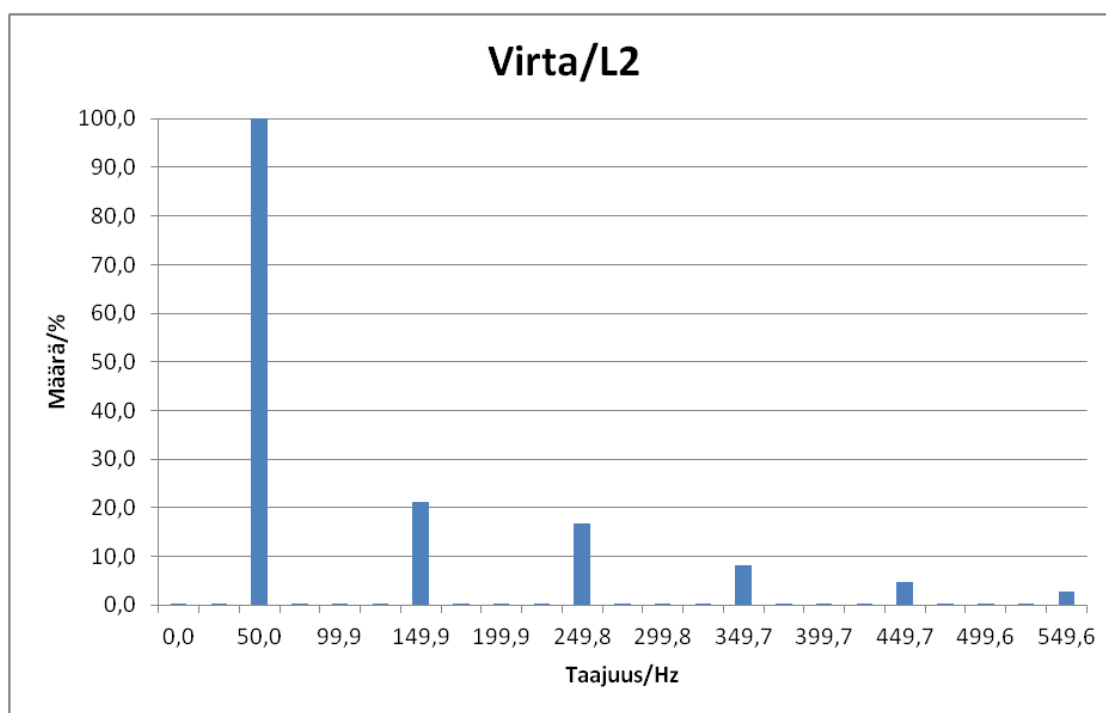
Viimeisenä mittauskohteena oli kiinteistön takaosan suurpainenatriumlamppuja sekä loisteputkivalaisimia ohjaava keskus. Mittaustulokset on esitelty seuraavassa:

Volt/Amps/Hertz				
	0:01:54			
	L1	L2	L3	N
V _{rms}	229.3	229.6	230.3	0.0
V _{pk}	334.3	336.3	338.0	0.1
CF	1.46	1.46	1.47	OL
Hz	49.97			
	L1	L2	L3	N
A _{rms}	112.5	103.2	108.4	0.0
A _{pk}	150.3	144.2	148.3	0.1
CF	1.34	1.40	1.37	OL
11/10/13 10:22:00 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
TREND				HOLD RUN

KUVA 37. 1C4-KRK22 virrat ja jännitteet



KUVA 38. L2 jännitteen viivaspektri THD-R: 3,1%



KUVA 39. L2 virran viivaspektri THD-R:28,5%

Keskuksen kuorma jakaantuu tasaisesti kunkin vaiheen välille (kuva 37). Yllä esitelty mittaustuloksista L2 jännitteen (kuva 38) ja virran (kuva 39) viivaspektrit. Virran mittaustulosta tarkastellessa huomataan kolmannen yliaallon suuri määrä. Tämä johtuu valaistuksena käytettävistä purkauslampuista. Suuri kolmannen yliaallon voimakkuus (noin 21 %, 22 A) aiheuttaa paluujohtimeen muiden vaiheiden kanssa noin 60 A:n

virran. Virran kokonaissärö THD-R on 28,5%. Virran sisältämät yliaallot säröyttävät jännitettä vähän. Sen kokonaissärö THD-R on 3,1%, eikä aiheuta toimenpiteitä.

6 JOHTOPÄÄTELMÄT JA YHTEENVETO

Teollisuuden laitoksissa energiankulutus on yleensä suurta. Teollisuuden laitokset jakaantuvat pääsääntöisesti kahteen eri kategoriaan. Laitoksiin, joissa on paljon erilaisia sähkökäyttöjä tai laitoksiin, joissa on suuria yksittäisiä sähkökäyttöjä. Sähkönlaadun näkökulmasta tarkasteltuna lopputulema on usein sama. Pienistä sähkökäyttöistä johtuvat häiriöt sähköverkkoon eivät yleensä yksinään ole ongelma. Kun pieniä häiriöitä tulee paljon, summautuu ne ja voivat kasvaa toisten kerrannaisina varsin voimakkaiksi häiriöiksi. Suurista sähkökäyttöistä aiheutuvat häiriöt voivat olla yksinään jo suuria, joten lopputulema on sama kun monista pienistä laitteista aiheutuvat häiriöt. Herkimät laitteet voivat kärsiä tai tehdä virheellisiä hälytyksiä häiriöiden takia. Syntyneiden häiriöiden poistamiseen on tehty erilaisia suotimia, joita käytetään aina tapauskohtaisesti.

TSP:lla käytettyjen sähkölaitteiden määrä on suuri ja erityisesti taajuusmuuttajakäyttöjen määrä on suuri, yli 100 kappaletta. Taajuusmuuttajakäyttöjen koko vaihtelee paljon, suurimmat käytöt ovat 350 kW kompressorit. Muiden käyttöjen koot vaihtelevat suurista 135 kW:n pumpuista aina pieniin noin yhden kilowatin annostelupumppeihin asti. Laitoksen sijainti lisää sähkökäytön tarvetta. Laitos sijaitsee kokonaan kallion sisällä, jolloin suuret prosessiallastilat on valaistava erillisellä valaistuksella, kun verrataan vanhan puhdistamon prosessiallaita, jotka sijaitsivat pääosin ulkona, ja näin pystyttiin hyödyntämään luonnonvaloa. Nykyiset allastilat on valaistava työturvallisuuden, sekä prosessivalvonnan takia. Valon tuottaminen on toteutettu päiväsaikaan suurpainenaatriumlampuilla ja tarvittaessa iltaisin käytetään loisteputkivalaisimia. Nämä kaikki kasvattavat hetkellisen tehon tarvetta, jonka suuruus vaihtelee 1,3 MW ja 2,5 MW välillä.

Sähkönlaatua tutkittaessa TSP:lla sähköinen kuorma koostuu valtaosin yliaaltoa aiheuttavista laitteistoista (ks. kohta 3.3.1 ja 3.3.2). Näiden laitteistojen takia ovat yliaaltomittaukset erittäin aiheelliset. Mittaukset tehtiin etu- ja takaosan pääkeskuksien kiinteistö- ja prosessipuolelta. Takaosan prosessipuolen mittaus tehtiin kahteen kertaan, toisella kerralla käytettiin syöttävänä muuntajana varamuuntajaa. Lisäksi tehtiin myös vertailu takaosan valaistusta ohjaavalle keskukselle (1C4-KRK22), jossa kuormana

käytettiin normaalisti käytettäviä suurpainenatriumlamppuja sekä vertailuna pelkkiä loisteputkivalaisimia.

Etuosan pääkeskuksen nimellisvirta on 2500 A ja takaosan 4000 A. Keskuksien kiskostot ovat erittäin hyvin kosketussuojatut. Hyvän kosketussuojan huonona puolena on se, että siihen käsiksi pääsy on haasteellista ilman jännitekatkoja tai työturvallisuuden vaarantamista. Välttääksemme jännitekatkot laitokselle, tehtiin mittaukset verkkoanalyysattoreiden virtamuuntajien takaa. Mittaustulokset redusoiitiin keskusten kiskoston tasoon virtamuuntajien muuntosuhteen avulla. Verkkoanalysaattorilla ei ollut mittapistettä paluujohtimeen, eikä siitä saatu mittaustuloksia. Paluujohtimessa kulkevan virran ja jännitteen laatu on oleellinen tieto kolmannen yliaallon aiheuttaman nollavirran takia. Paluujohdinta analysoidaan teoreettisella tasolla.

Mittaustuloksia tutkimalla huomataan, ettei jännitteen kokonaissärön (THD-F) määrä nouse missään mittauspisteessä yli 5 %. Kokonaissärön määrää on käytännössä mahdotonta saada nolnaan, joten alle 5 % määrää voidaan pitää hyvänä. Virran kokonaissärön (THD-F) määrä vaihtelee mittauspisteistä riippuen 22 % ja 31 % välissä. Virtojen kokonaissärön suuruus ei ole haitallinen, koska jännitteen säröt pysyvät alhaisina. Valaistuksia ohjaavan keskuksen 1C4-KRK22 mittaustuloksista oli havaittavissa kolmatta yliaaltoja kohtalaisesti, noin 20 % perusaallosta. Tällaisissa tilanteissa, jossa kolmannen yliaallon osuus on merkittävä, on kiinnitettävä erikoista huomiota paluujohtimen poikkipintaan (nollavirta, ks. kohta 3.3.1). Valaistuskuorman vaihtuessa suurpainenatriumlampuista loisteputkivalaisimiin ilmeni mittaustuloksista lievä yliaaltojen määrän vähentyminen (Suurpainenatriumlamput: Jännite THD-R: 3,1 %, Virta THD-R: 28,5 %. Loisteputkivalaisimet: Jännite THD-R: 2,6 %, Virta THD-R: 24,2 %). Laitoksella tehtyjä mittauksia voidaan pitää onnistuneina, koska saadut tulokset täyttävät standardissa annetut yliaaltojen raja-arvot. Lisäksi mittaustuloksia verrattiin mittaushetkellä laitoksen omien verkkoanalysaattoreiden näyttämiin arvoihin, saadut mittaustulokset ja laitoksen omat verkkoanalysaattoreiden arvot eivät poikenneet merkittävästi toisistaan. Näiden lopputuloksien perusteella voidaan laitoksen sähkönlaatua pitää hyvänä. Tehtyjen mittausten aikana laitoksen kuormitus ei ollut suurimmillaan. Suurempi kuormitus kasvattaa prosessissa käytettävien pumppujen ja muiden sähkölaitteiden määrää, joiden takia voi sähkönlaatu muuttua hetkellisen kuormituksen mukaisesti.

Mahdollisten laajennusten yhteydessä on syytä ottaa huomioon uusien kuormien aiheuttamat yliaallot ja niiden mahdollinen summautuminen jo olemassa oleviin säröihin sekä niiden suodatuksen tarve jo suunnittelu vaiheessa. Teollisuuden käyttöjä ajatellen markkinoille on kehitetty vaihtoehtoisia ratkaisuja ulkoisen suotimen käytölle. Vaihtoehtoisia ratkaisuja ovat muunmuossa taajuusmuuttajat, joihin on tehty sisäinen suodin. Suotimella varustetulla taajuusmuuttajalla pystytään helposti pitämään sähkönlaatu hyvänä. Lisäksi on myös mahdollista käyttää tasasähköjakelua. Tällaisessa ratkaisussa tasasuunnataan yksi iso lähtö kerran. Tasasähkö johdetaan kiskostoon, jossa on lähdöt tarvittaville komponenteille, jokaisella lähdöllä on oma vaihtosuuntaaja. Tämä pienentää tasasuuntauksien määrää (jokainen vaihtosähköllä toimiva taajuusmuuttaja tasasuuntaa ensin syötetyn jännitteen ja sen jälkeen uudestaan vaihtosuuntaa tasasuunnatun jännitteen halutulle taajuudelle) ja vähentää näin tasasuuntauksesta johtuvaa häiriötä. Kiinteistösähkössä yliaaltoja tulee ensisijaisesti tarkkailla lisääntyneen elektroniikan yleistymisessä. Tietokoneiden määrä lisääntyy helposti laajennusten yhteydessä, jolloin tulee erityisesti käyttää yksivaiheisia syöttöjä nollavirran minimoimiseksi. Sähkönlaatua tuleekin ajatella aina muutoksia tai lisäyksiä tehdessä.

LÄHTEET

Suomen standardisoimisliitto SFS ry. SFS-EN 50160:2010. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet

Korpinen, L., Mikkola, M., Keikko, T., Falck, E., Yliaalto-opus.

Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S., Öistämö, J., Tekniikan kaavasto. Tampere: Tammertekniikka/Amk-Kustannus Oy

Mäkinen, M.J.J. & Kallio, R., 2004. Teollisuuden sähköasennukset. Keuruu: Otavan kirjapaino Oy

ABB Control Oy. Kolmannen yliaallon opas. Tulostettu 30.10.2013.

ABB, Yliaaltosuodatin pienjänniteverkkoon. Tulostettu 10.12.2013.

Hietalahti, L., 05.03.2009. Verkon yliaaltoanalyysi, Versio 1.0

Harsia, P., Hietalahti, L., Johtimen mitoitus ja yliaallot. Tulostettu 02/2014

Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 2012. SFS-EN 6000-5-52 liite B. Kaapelien kuormitettavuus

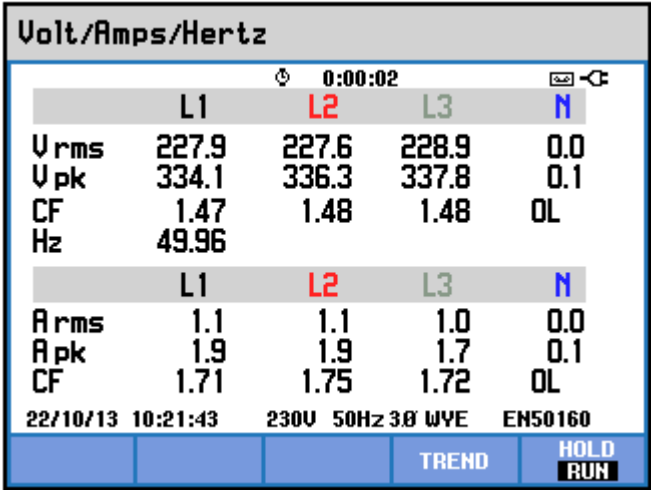
Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 2012. SFS-EN 6000-5-52 liite E. Harmonisten yliaaltojen vaikutus kolmivaihejärjestelmissä

ABB Industry Oy, Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas. Tulostettu 3.12.2013.

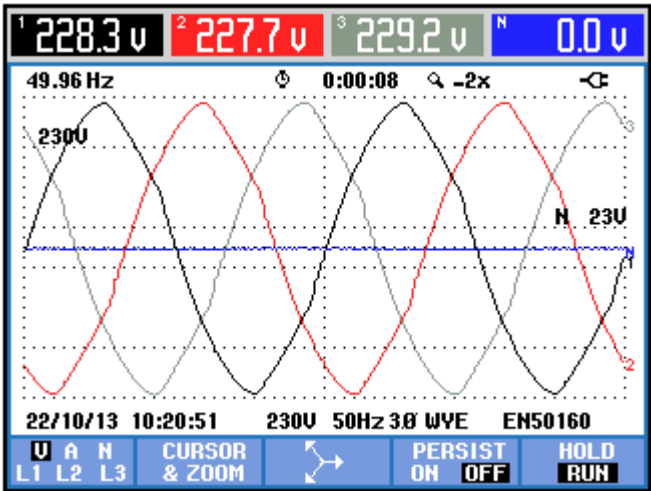
LIITTEET

Liite 1. Mittaustulokset, 1C1-PK1

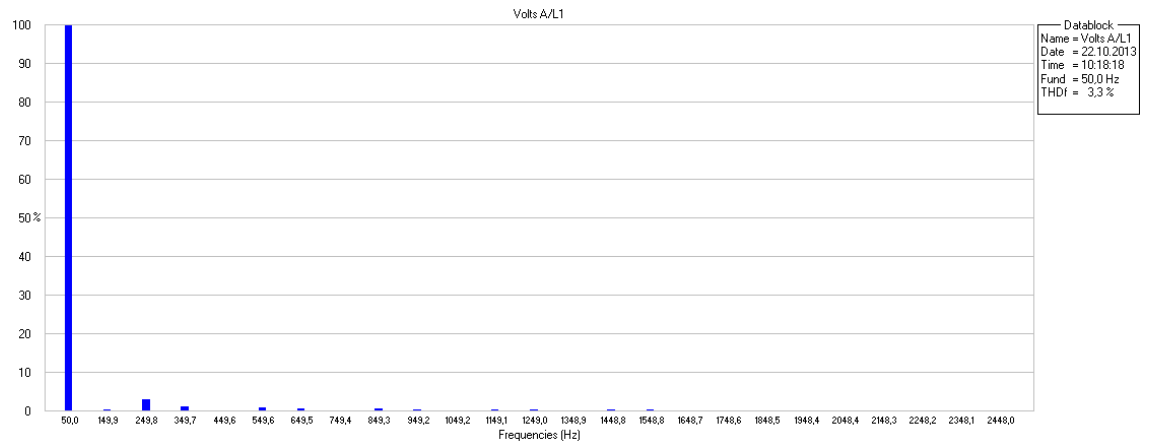
1(6)



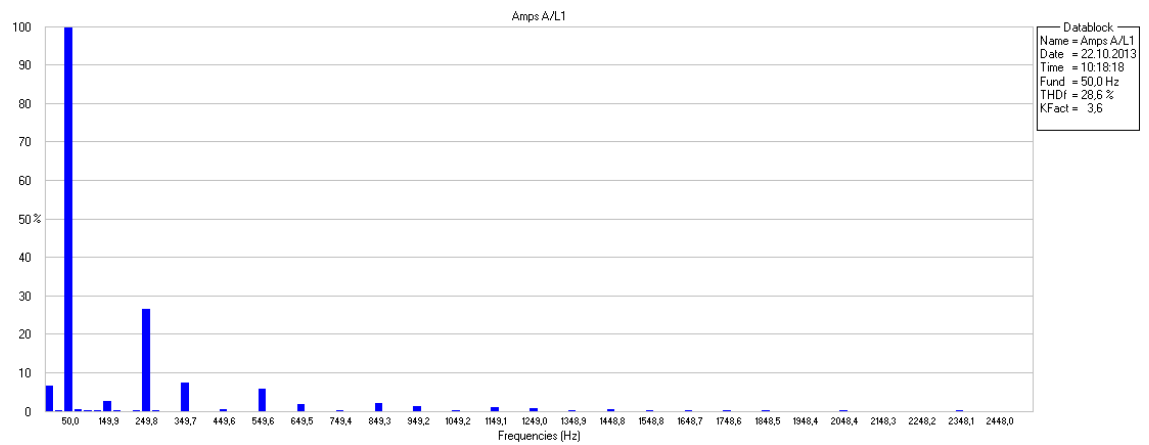
KUVA 40. 1C1-PK1 prosessipuolen jännitteet ja virrat



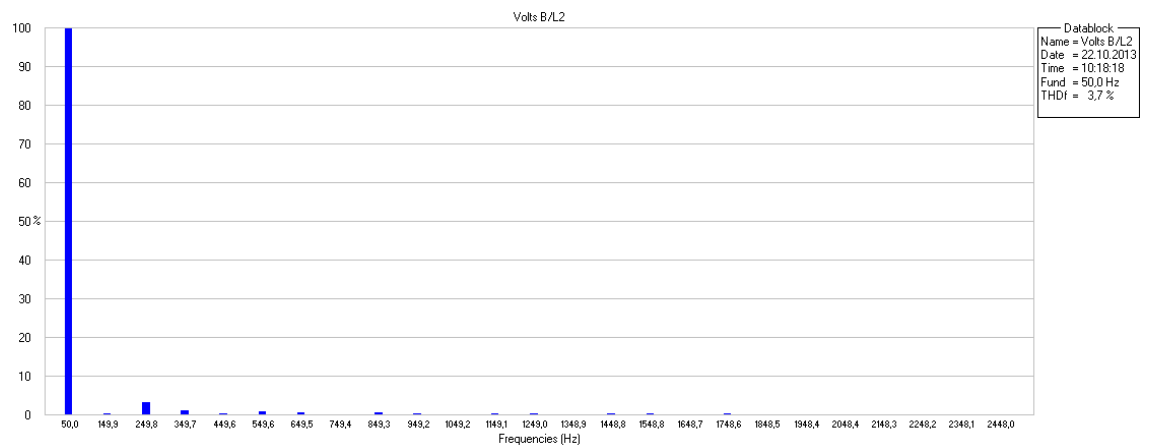
KUVA 41. 1C1-PK1 prosessipuolen jännitteen kuvaajat



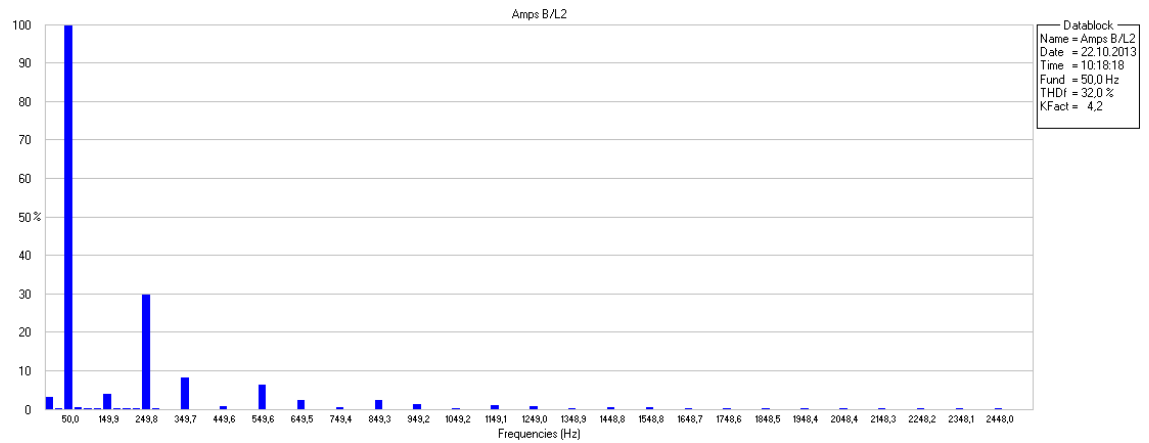
KUVA 42. 1C1-PK1 prosessipuolen L1 jännite



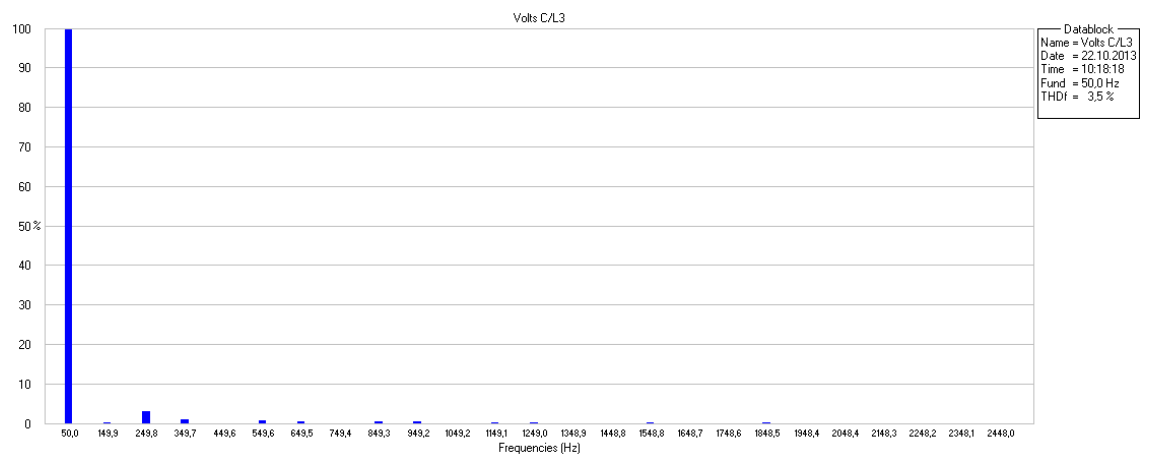
KUVA 43. 1C1-PK1 prosessipuolen L1 virta



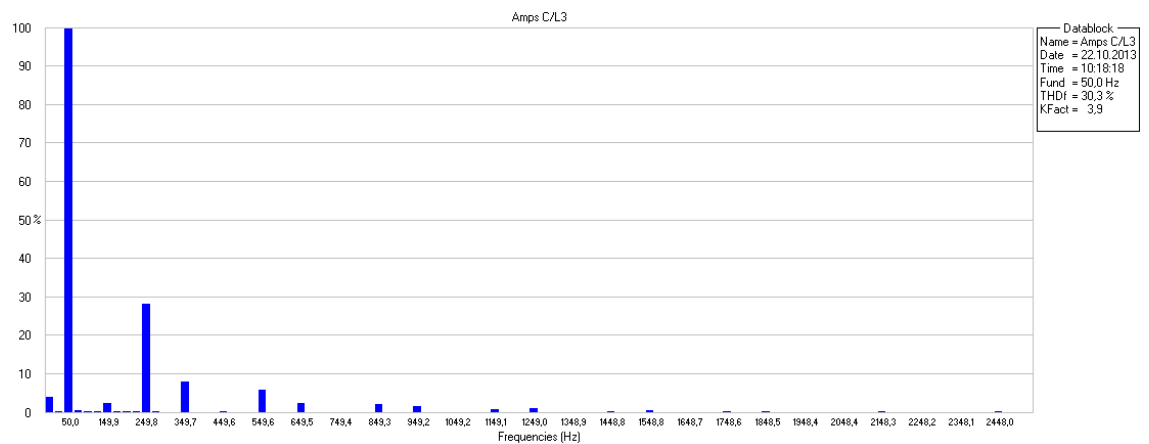
KUVA 44. 1C1-PK1 prosessipuolen L2 jännite



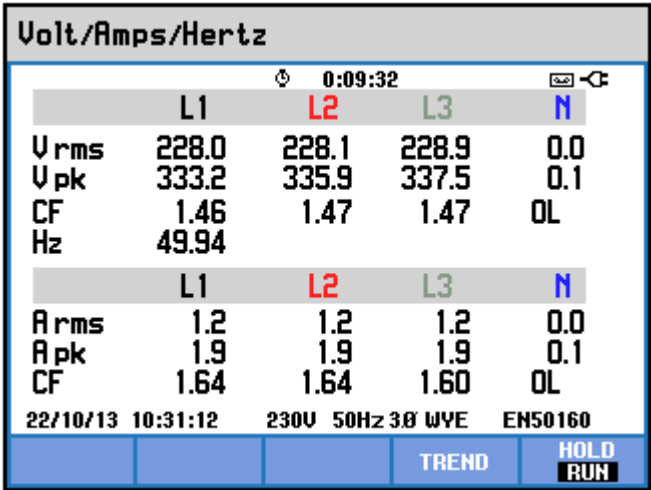
KUVA 45. 1C1-PK1 prosessipuolen L2 virta



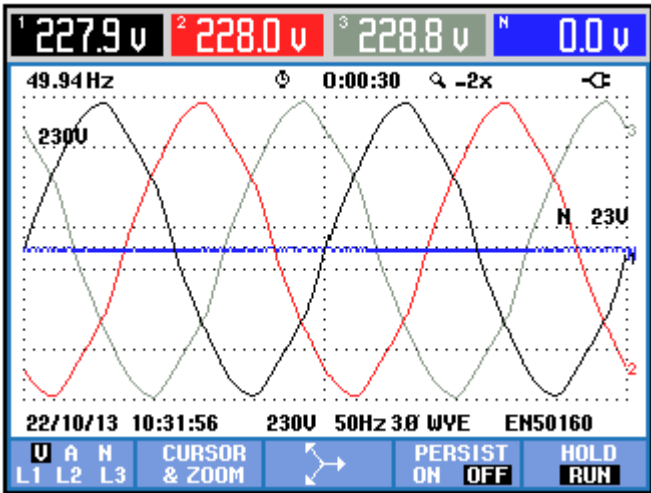
KUVA 46. 1C1-PK1 prosessipuolen L3 jännite



KUVA 47. 1C1-PK1 prosessipuolen L3 virta

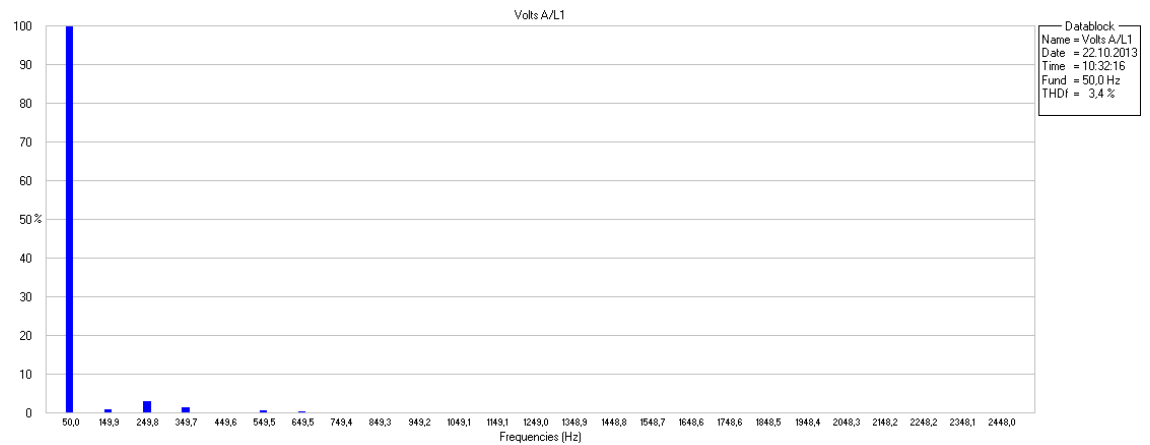


KUVA 48. 1C1-PK1 kiinteistöpuolen virrat ja jännitteet

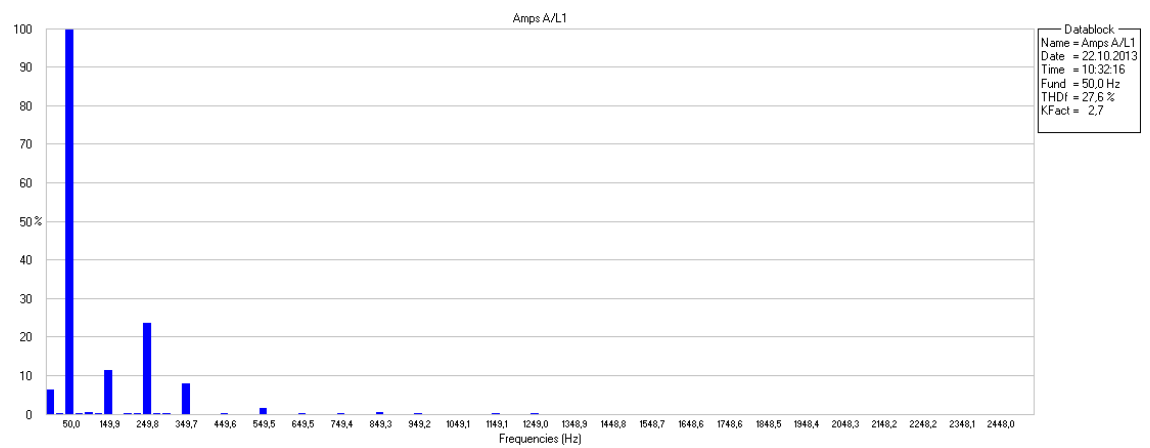


KUVA 49. 1C1-PK1 kiinteistöpuolen jännitteen kuvaajat

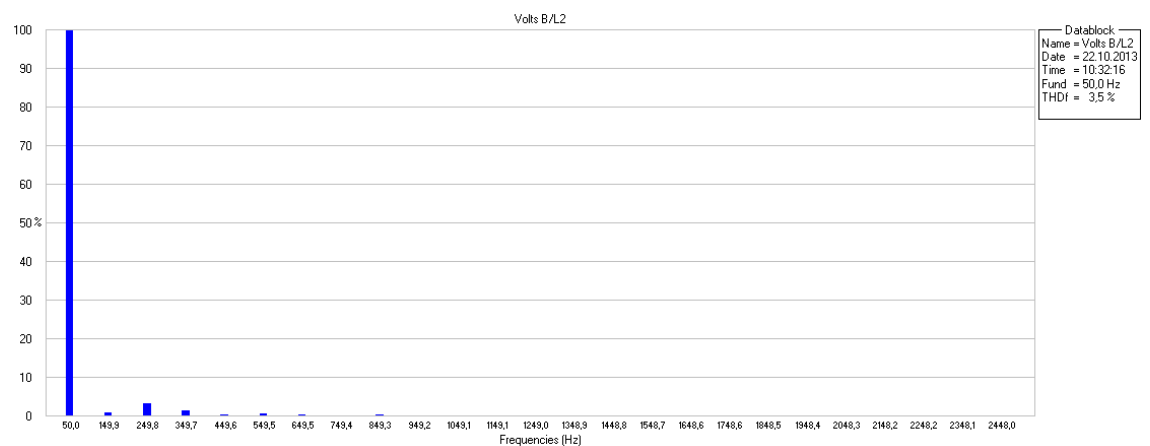
5(6)



KUVA 50. 1C1-PK1 kiinteistöpuolen L1 jännite

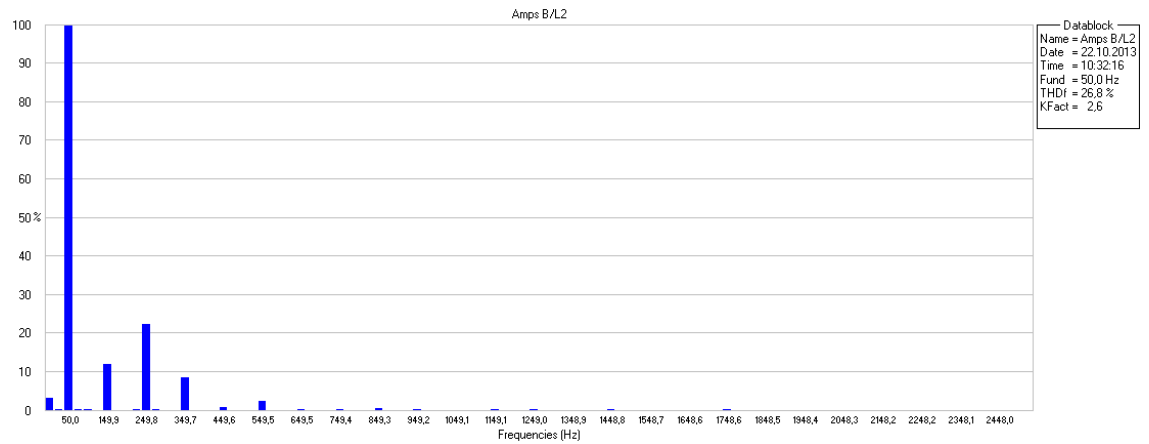


KUVA 51. 1C1-PK1 kiinteistöpuolen L1 virta

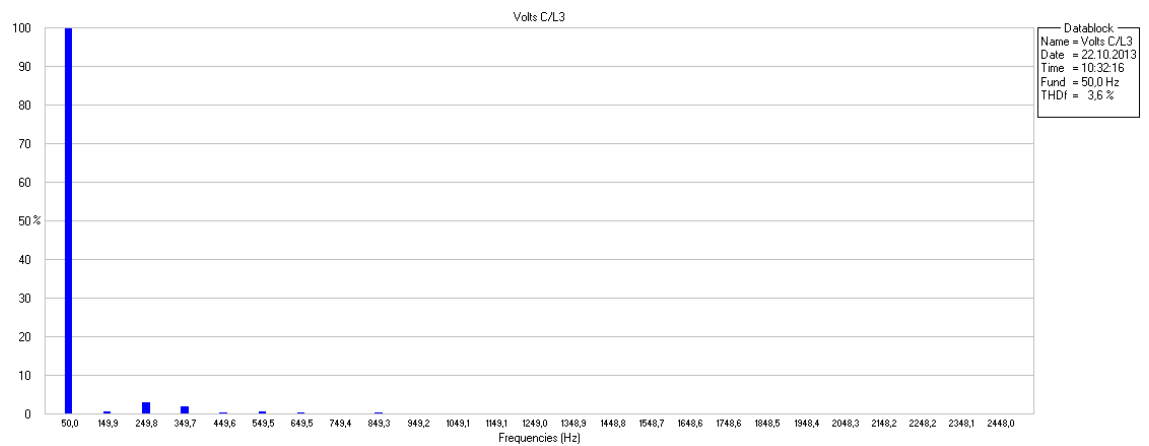


KUVA 52. 1C1-PK1 kiinteistöpuolen L2 jännite

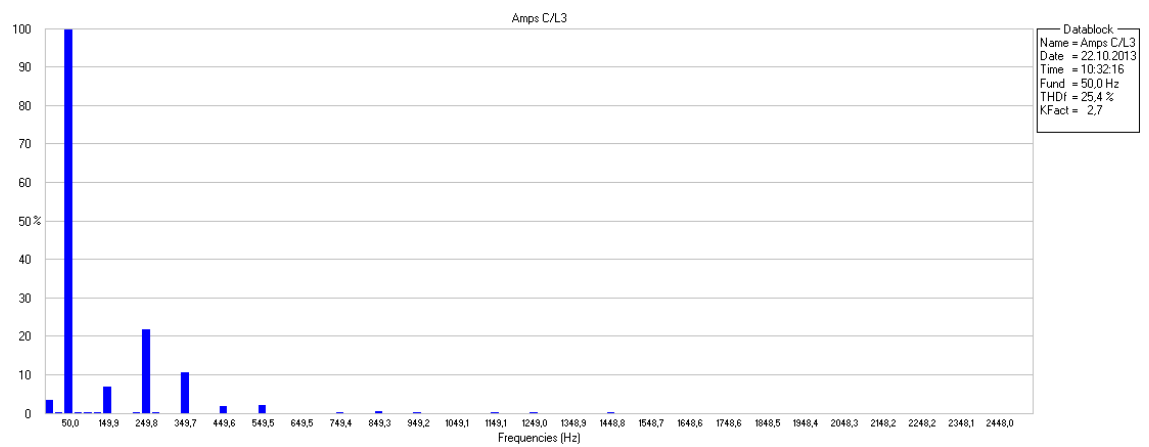
6(6)



KUVA 53. 1C1-PK1 kiinteistöpuolen L2 virta



KUVA 54. 1C1-PK1 kiinteistöpuolen L3 jännite



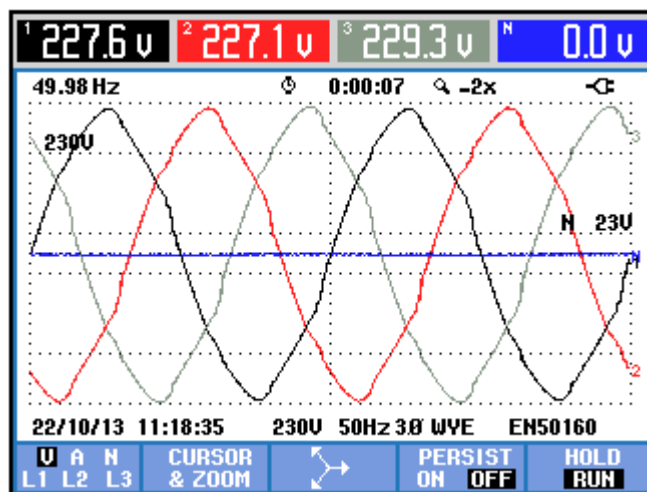
KUVA 55. 1C1-PK1 kiinteistöpuolen L3 virta

Liite 2. Mittaustulokset, 1C4-PK2

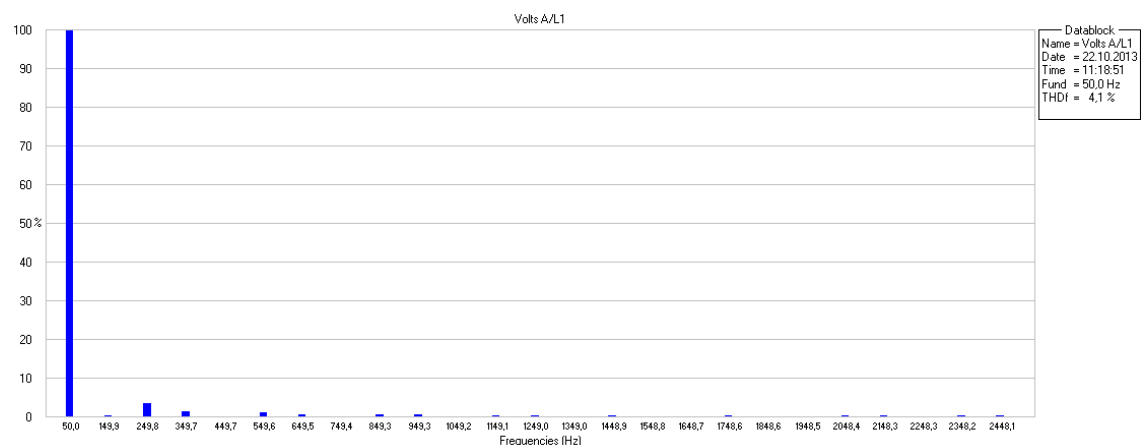
1(6)

Volt/Amps/Hertz				
	L1	L2	L3	N
V _{rms}	227.7	227.2	229.4	0.0
V _{pk}	336.2	338.9	340.3	0.1
CF	1.48	1.49	1.48	OL
Hz	49.96			
	L1	L2	L3	N
A _{rms}	1.9	1.8	1.8	0.0
A _{pk}	3.0	3.0	2.9	0.1
CF	1.60	1.65	1.61	OL
22/10/13 11:18:16 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
TREND				HOLD RUN

KUVA 56. 1C4-PK2 prosessipuolen virrat ja jännitteet

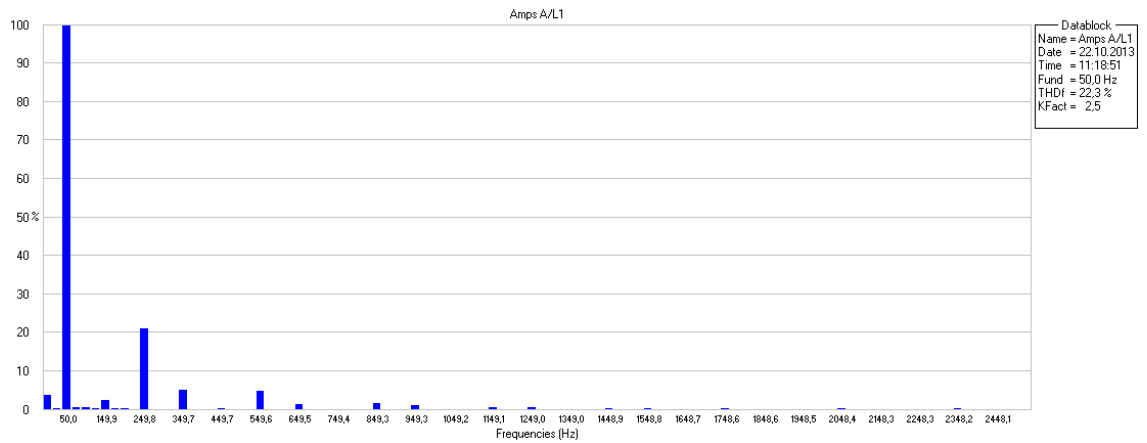


KUVA 57. 1C4-PK2 prosessipuolen jännitteen kuvaaja

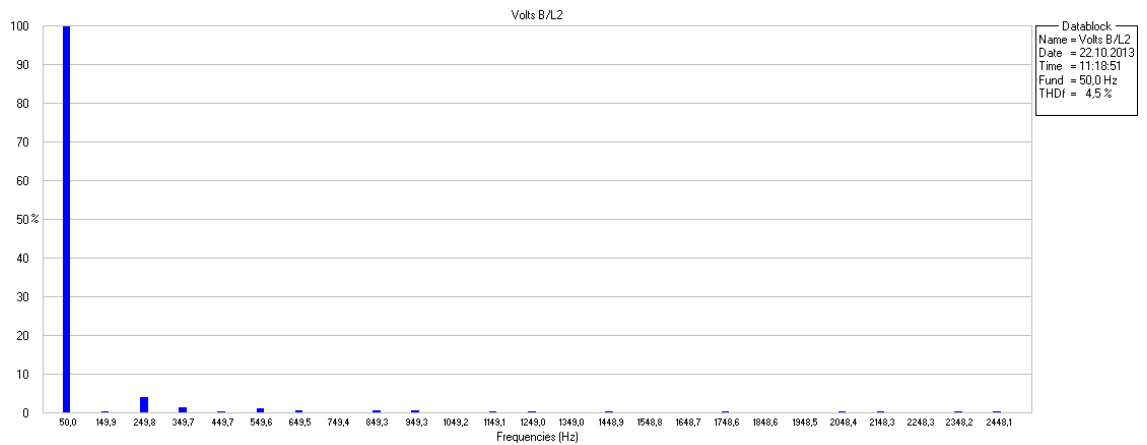


KUVA 58. 1C4-PK2 prosessipuolen L1 jännite

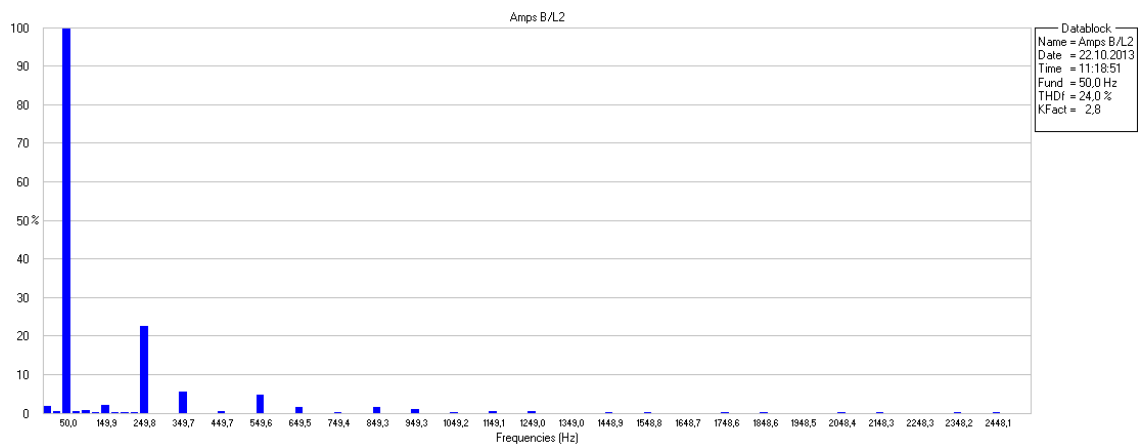
2(6)



KUVA 59. 1C4-PK2 prosessipuolen L1 virta

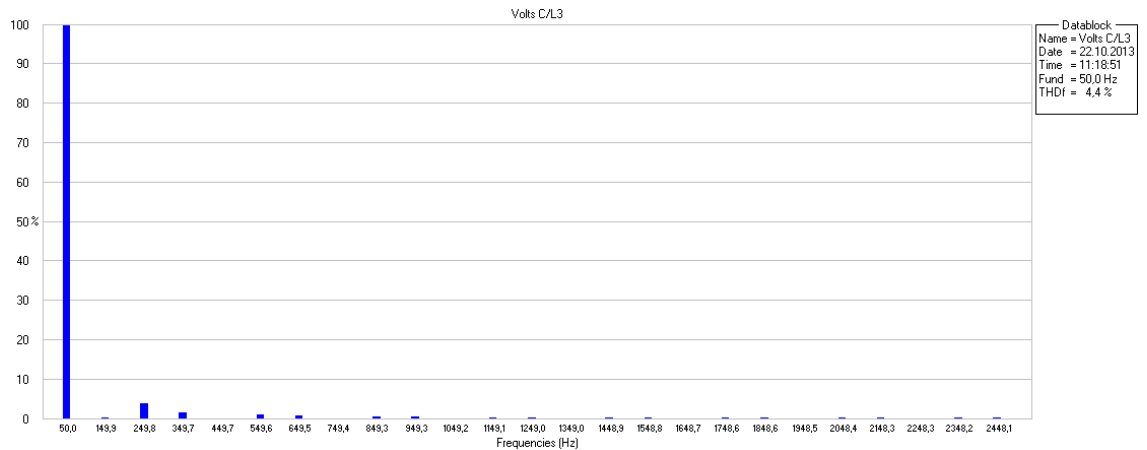


KUVA 60. 1C4-PK2 prosessipuolen L2 jännite

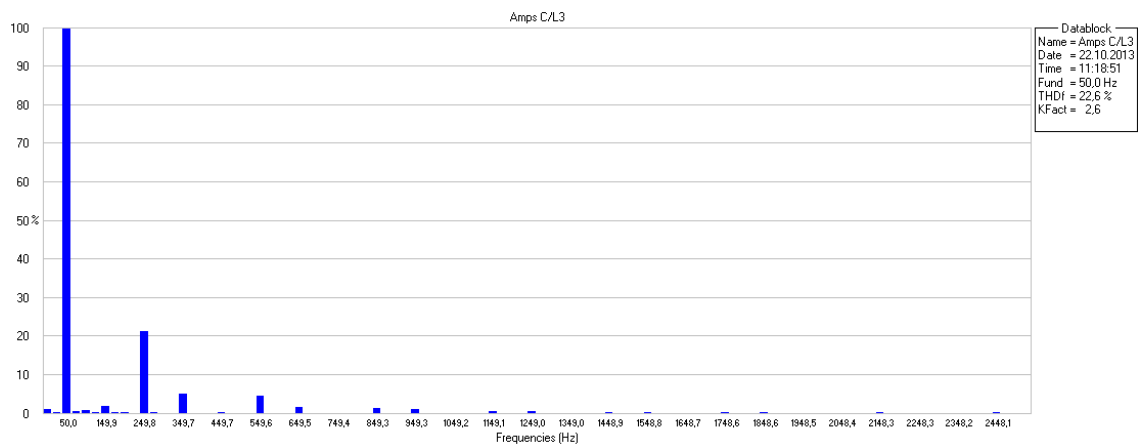


KUVA 61. 1C4-PK2 prosessipuolen L2 virta

3(6)



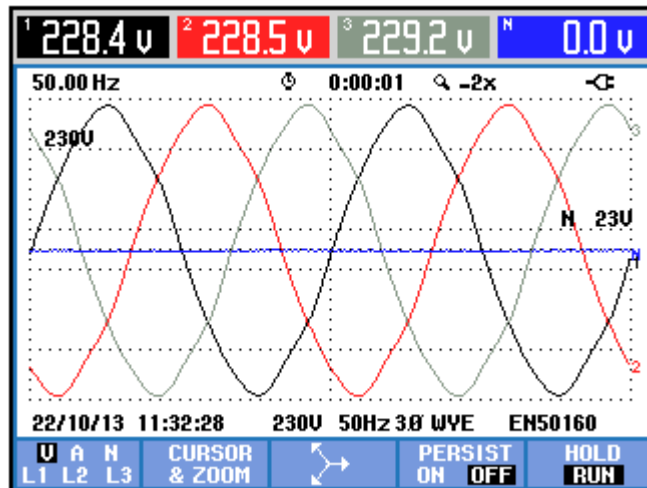
KUVA 62. 1C4-PK2 prosessipuolen L3 jännite



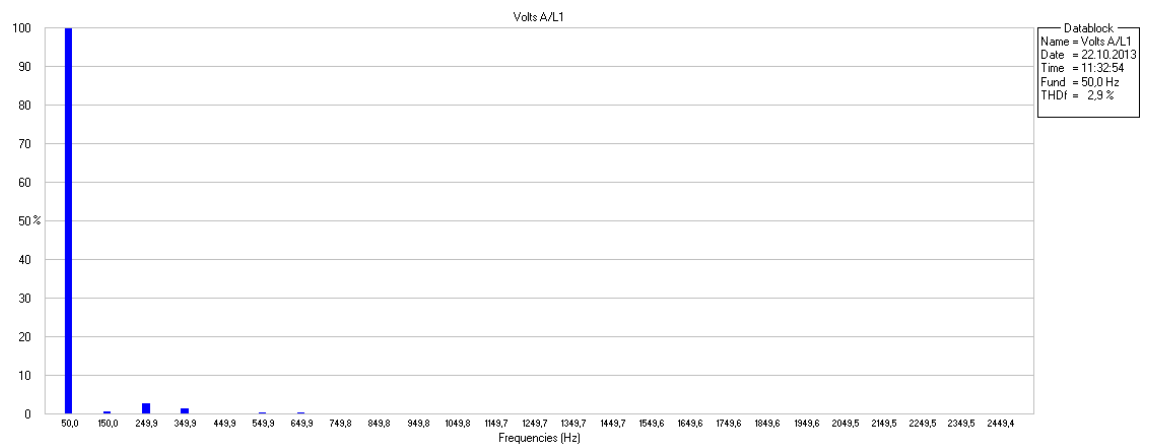
KUVA 63. 1C4-PK2 prosessipuolen L3 virta

Volt/Amps/Hertz				
	0:00:02			
	L1	L2	L3	N
Vrms	228.4	228.4	229.1	0.0
Vpk	332.8	334.6	335.8	0.1
CF	1.46	1.46	1.47	OL
Hz	49.98			
	L1	L2	L3	N
Arms	0.8	0.8	0.8	0.0
Apk	1.4	1.4	1.5	0.1
CF	1.71	1.83	1.76	OL
22/10/13 11:32:43 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
TREND				HOLD
				RUN

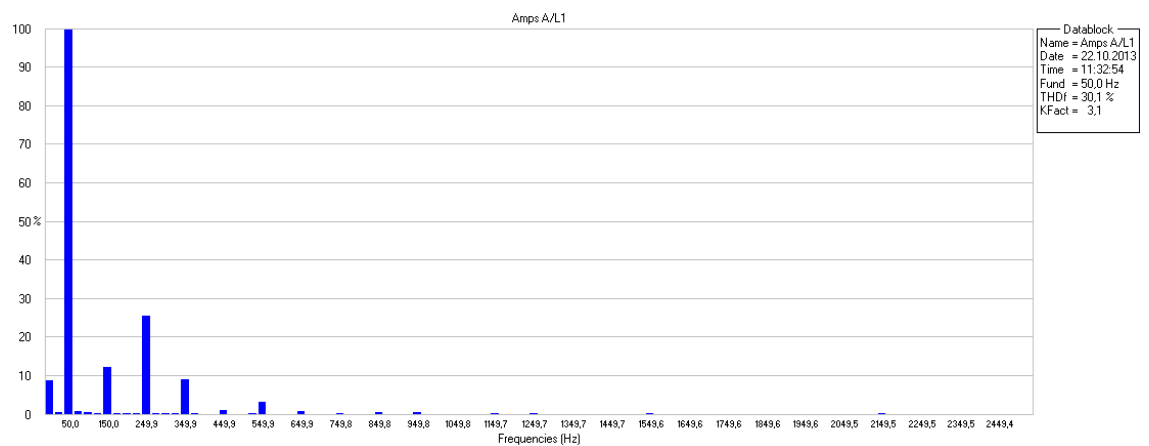
KUVA 64. 1C4-PK2 kiinteistöpuolen virrat ja jännitteet



KUVA 65. 1C4-PK2 kiinteistöpuolen jännitteen kuvaajat

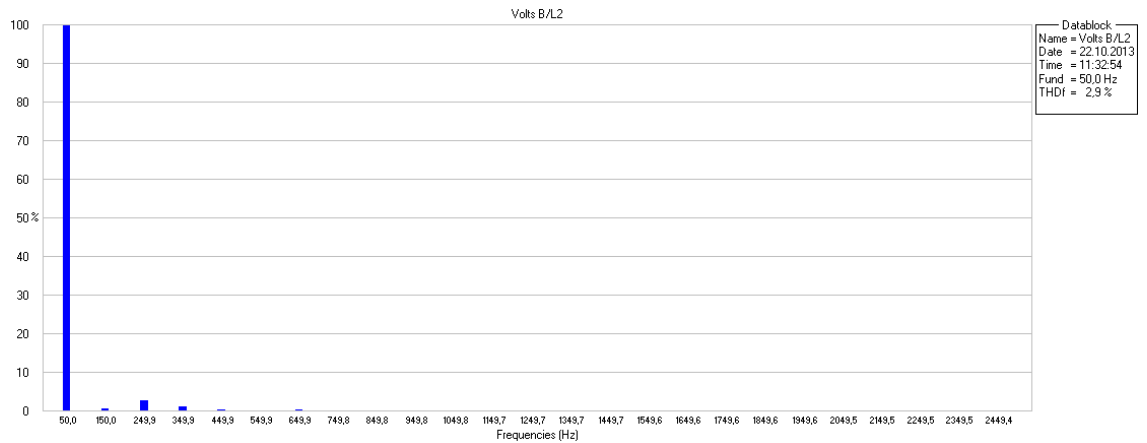


KUVA 66. 1C4-PK2 kiinteistöpuolen L1 jännite

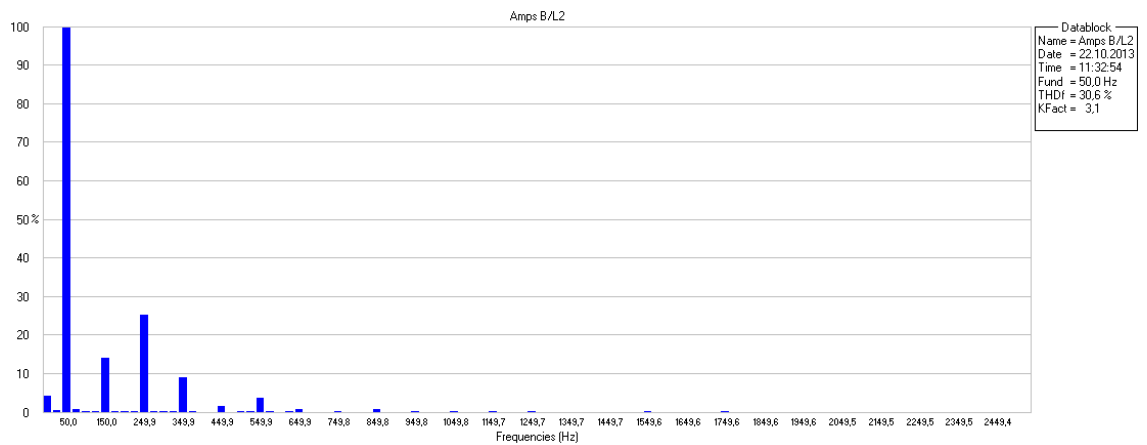


KUVA 67. 1C4-PK2 kiinteistöpuolen L1 virta

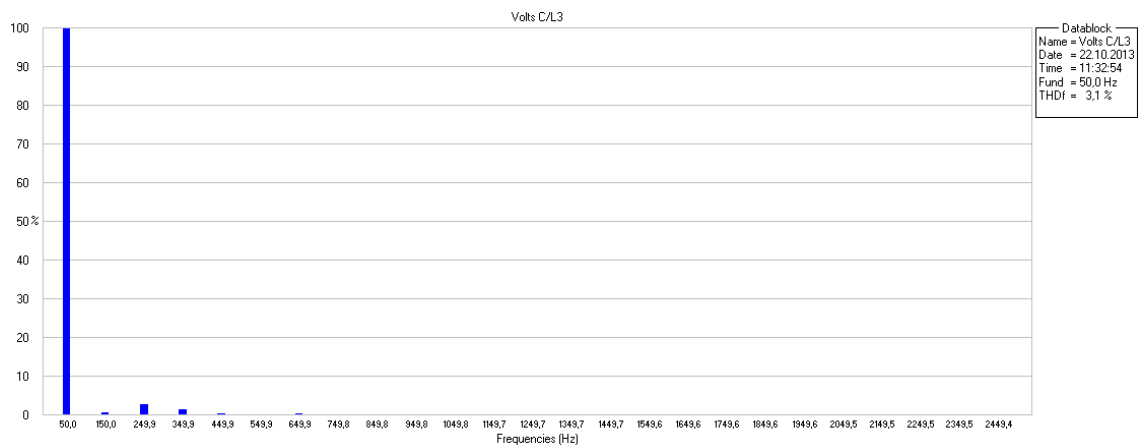
5(6)



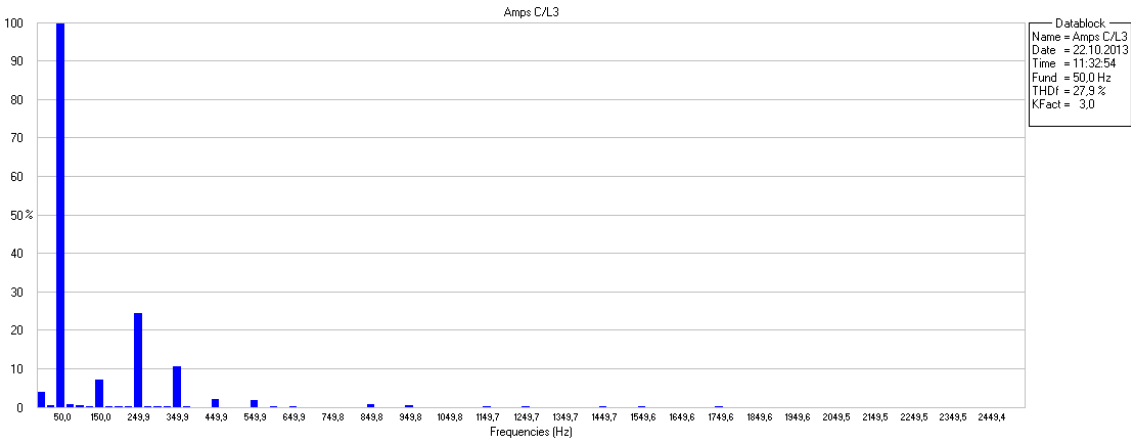
KUVA 68. 1C4-PK2 kiinteistöpuolen L2 jännite



KUVA 69. 1C4-PK2 kiinteistöpuolen L2 virta



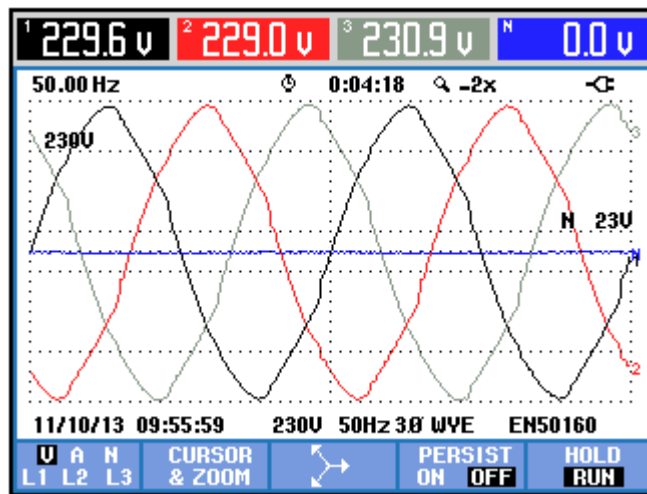
KUVA 70 1C4-PK2 kiinteistöpuolen L3 jännite



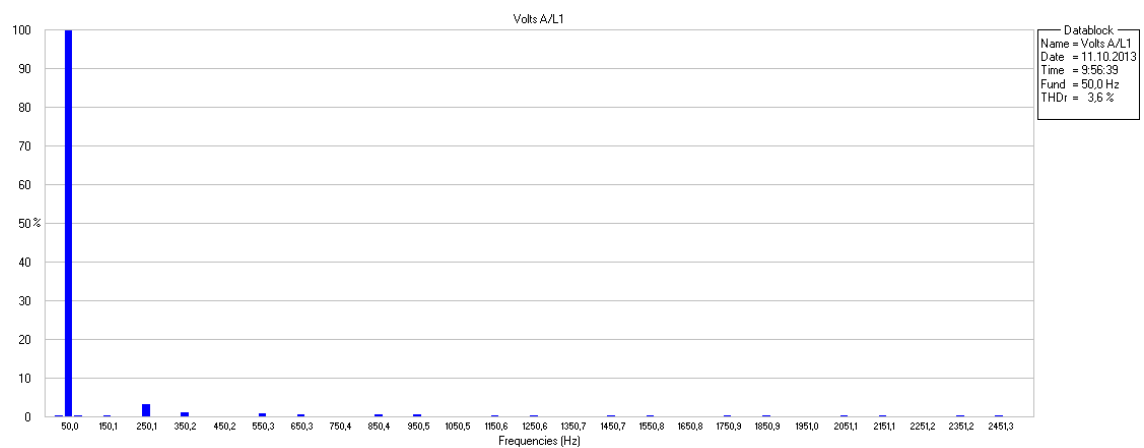
KUVA 71 1C4-PK2 kiinteistöpuolen L3 virta

Liite 3. Mittaustulokset, 1C4-PK2 prosessipuoli ennen ja jälkeen muuntajan vaihtoa

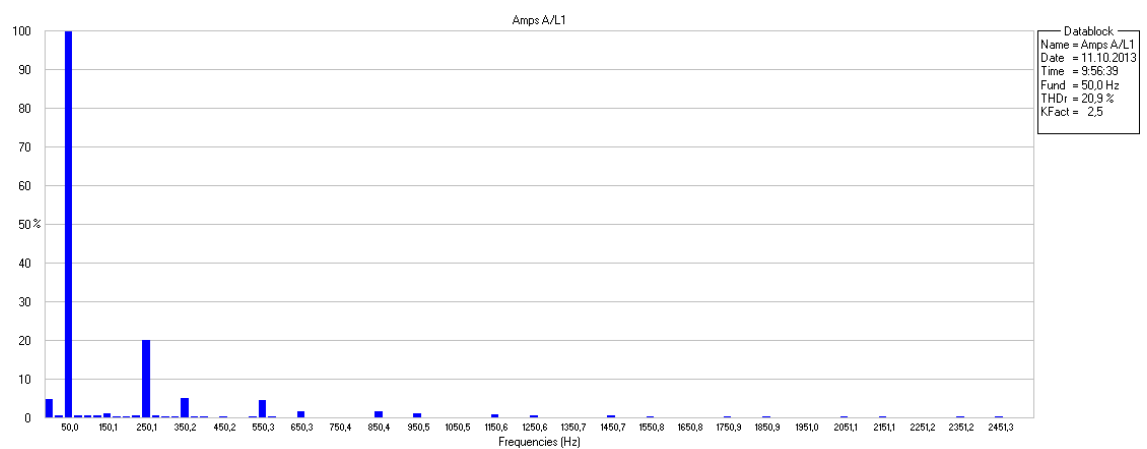
1(5)



KUVA 72. Jännitteen kuvaajat ennen muuntajan vaihtoa

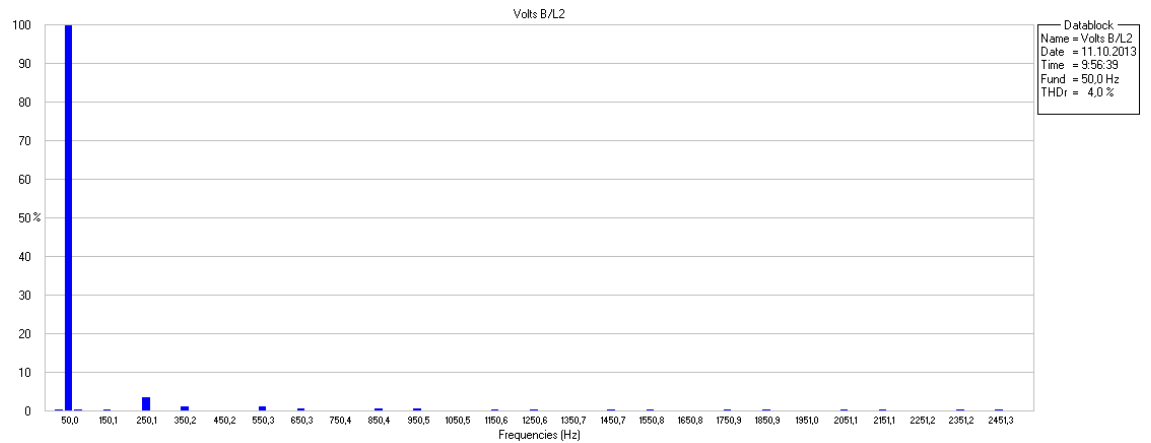


KUVA 73. L1 jännite ennen muuntajan vaihtoa

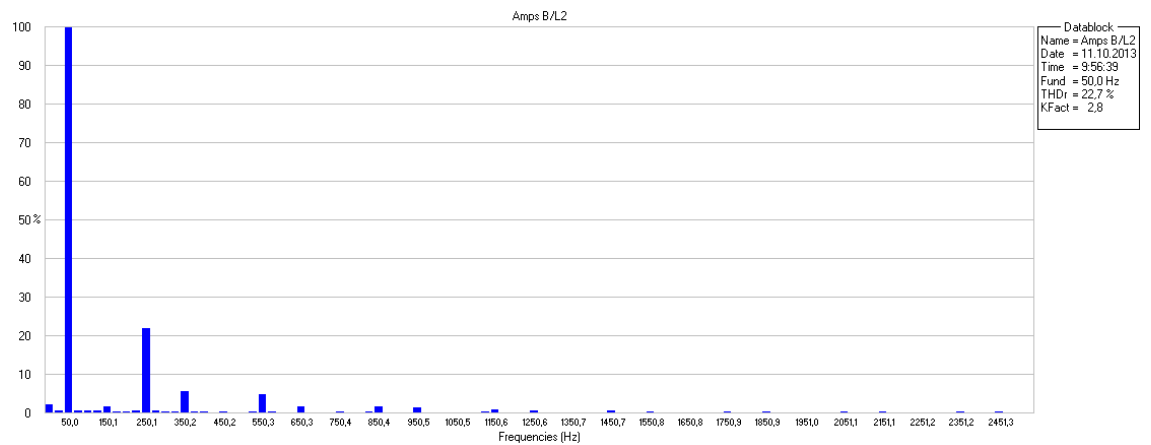


KUVA 74. L1 virta ennen muuntajan vaihtoa

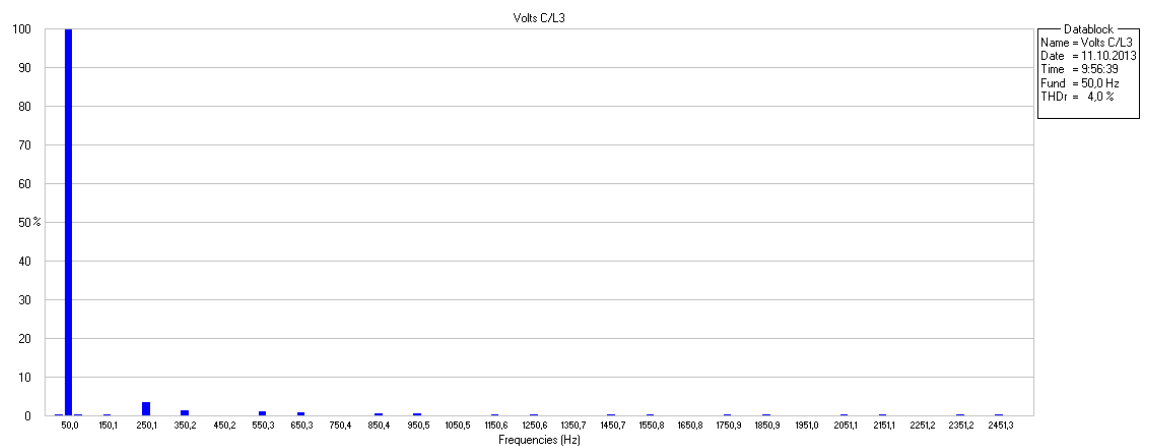
2(5)



KUVA 75. L2 jännite ennen muuntajan vaihtoa

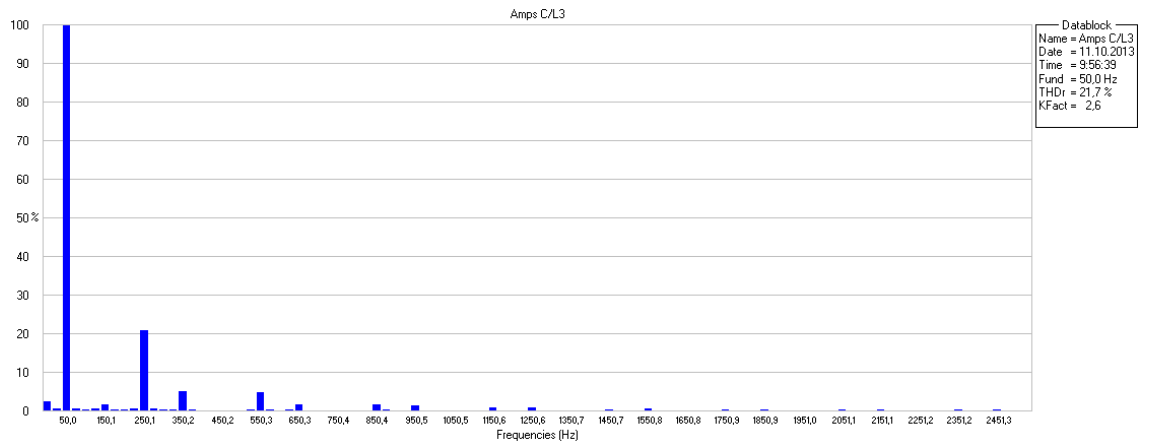


KUVA 76. L2 virta ennen muuntajan vaihtoa

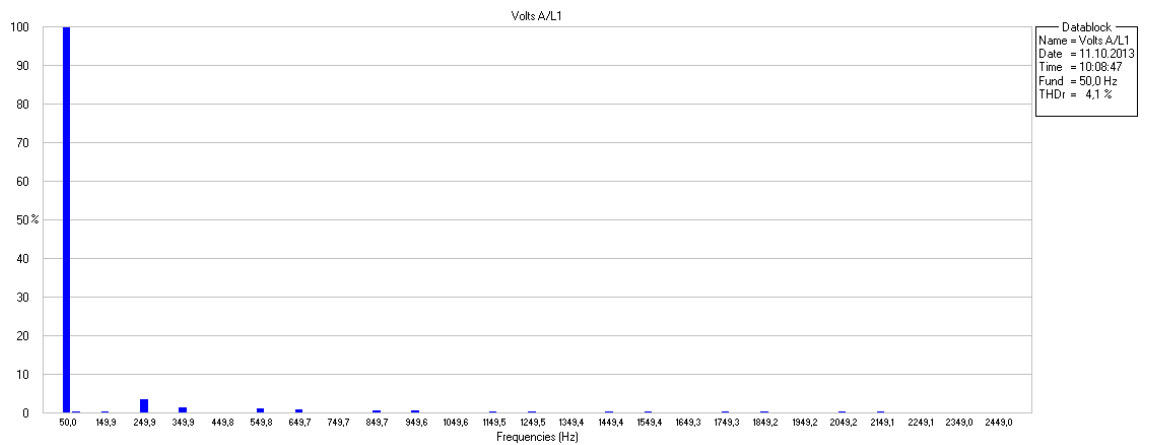


KUVA 77. L3 jännite ennen muuntajan vaihtoa

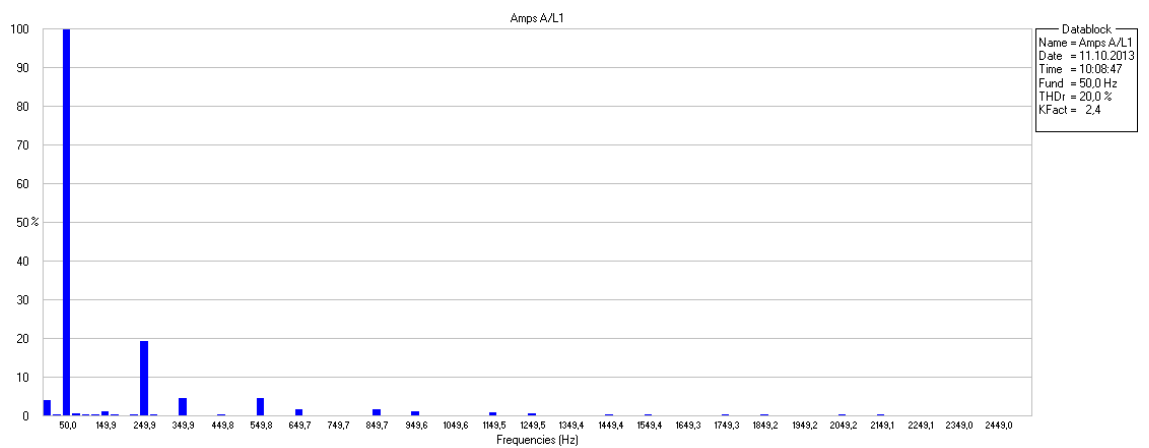
3(5)



KUVA 78. L3 virta ennen muuntajan vaihtoa

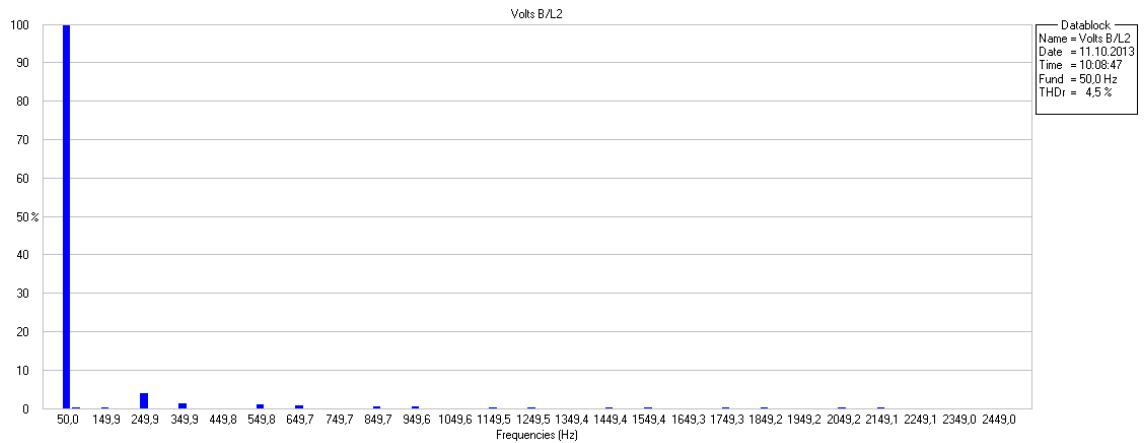


KUVA 79. L1 jännite muuntajan vaihdon jälkeen

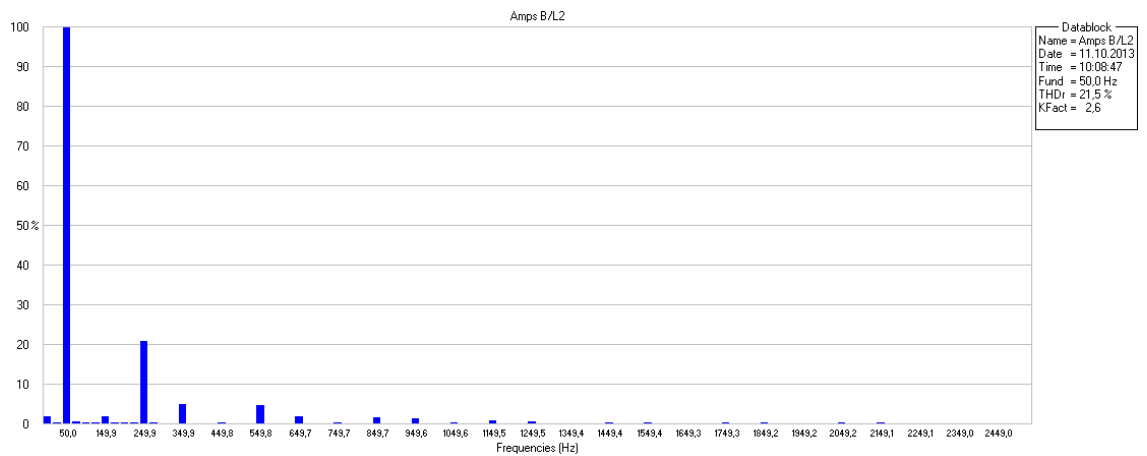


KUVA 80. L1 virta muuntajan vaihdon jälkeen

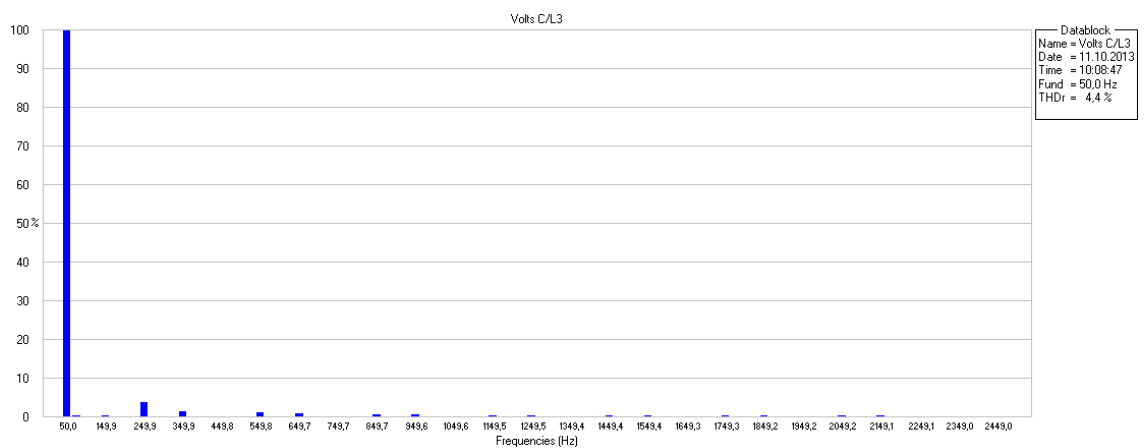
4(5)



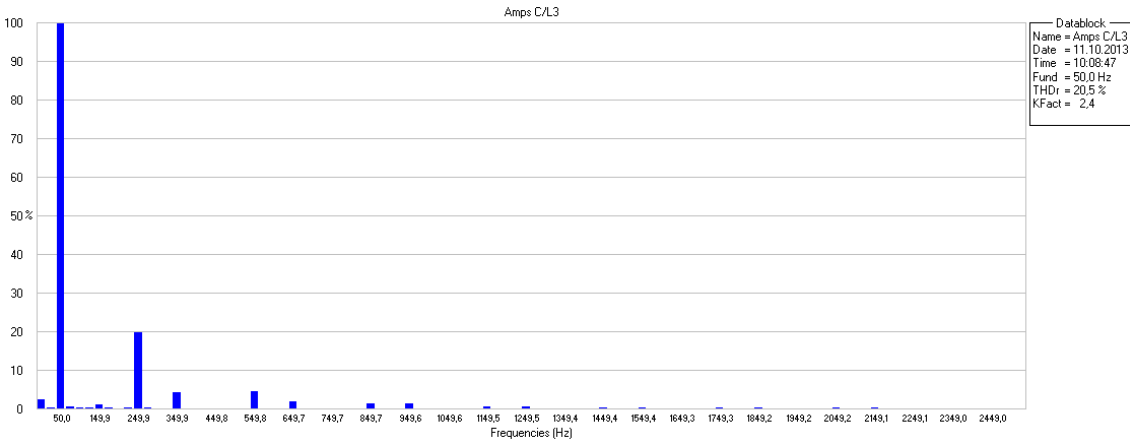
KUVA 81. L2 jännite muuntajan vaihdon jälkeen



KUVA 82. L2 virta muuntajan vaihdon jälkeen



KUVA 83. L3 jännite muuntajan vaihdon jälkeen



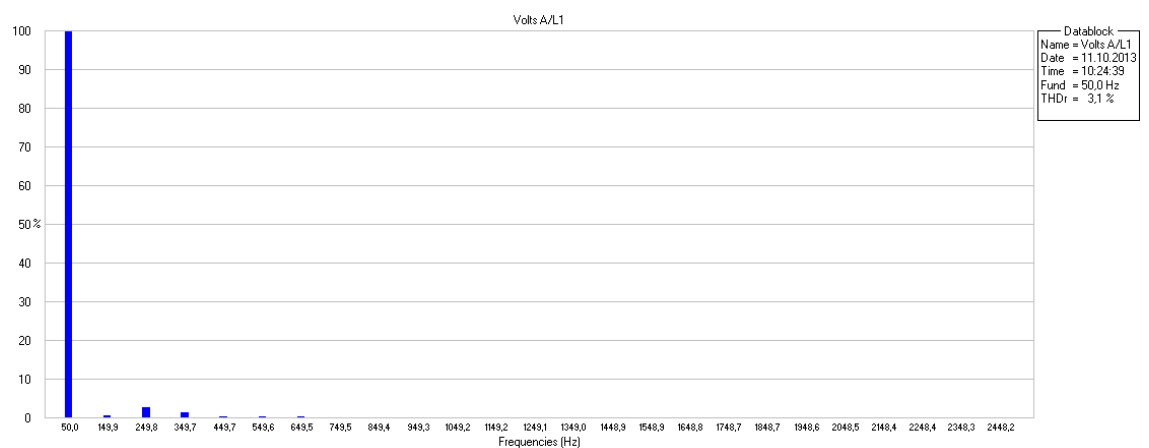
KUVA 84. L3 virta muuntajan vaihdon jälkeen

Liite 4. Mittaustulokset, 1C4-KRK22 suurpainenatriumlampuilla ja loisteputkivalaisimilla

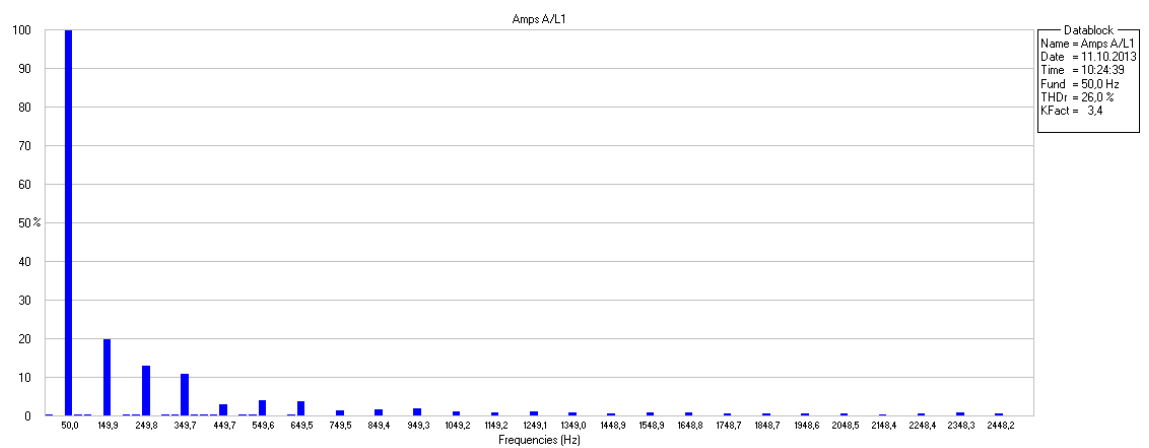
1(5)

Volt/Amps/Hertz				
	0:01:54			
	L1	L2	L3	N
V _{rms}	229.3	229.6	230.3	0.0
V _{pk}	334.3	336.3	338.0	0.1
CF	1.46	1.46	1.47	OL
Hz	49.97			
	L1	L2	L3	N
A _{rms}	112.5	103.2	108.4	0.0
A _{pk}	150.3	144.2	148.3	0.1
CF	1.34	1.40	1.37	OL
11/10/13 10:22:00 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
TREND				HOLD RUN

KUVA 85. Virrat ja jännitteet suurpainenatriumlampuilla

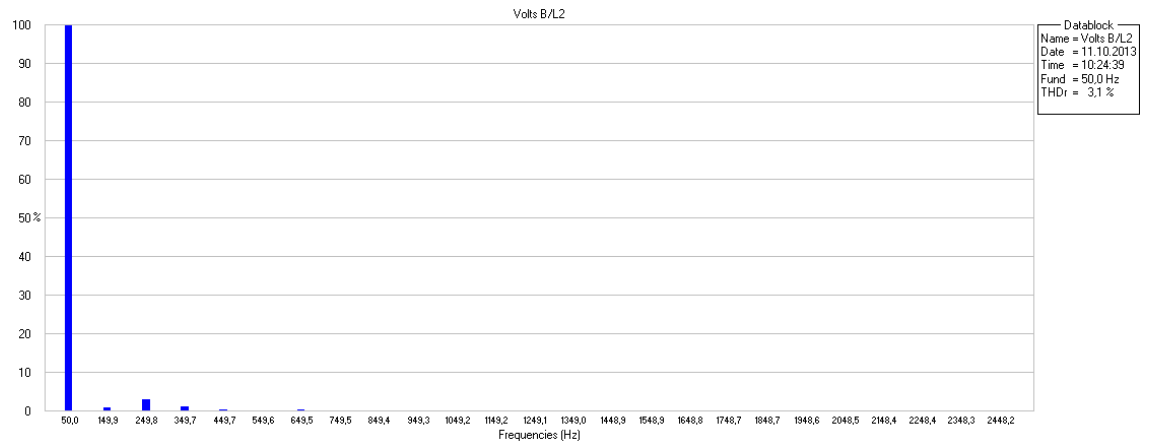


KUVA 86. L1 jännite suurpainenatriumlampuilla

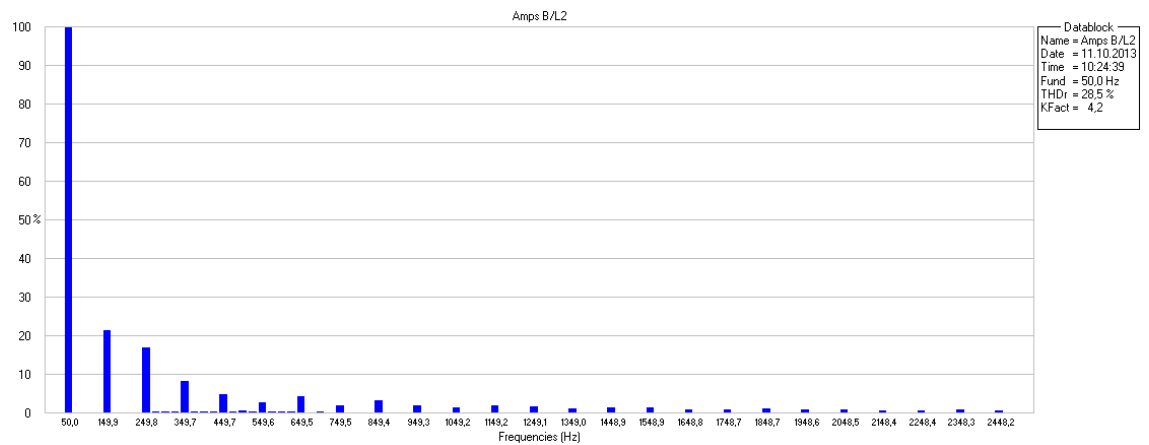


KUVA 87. L1 virta suurpainenatriumlampuilla

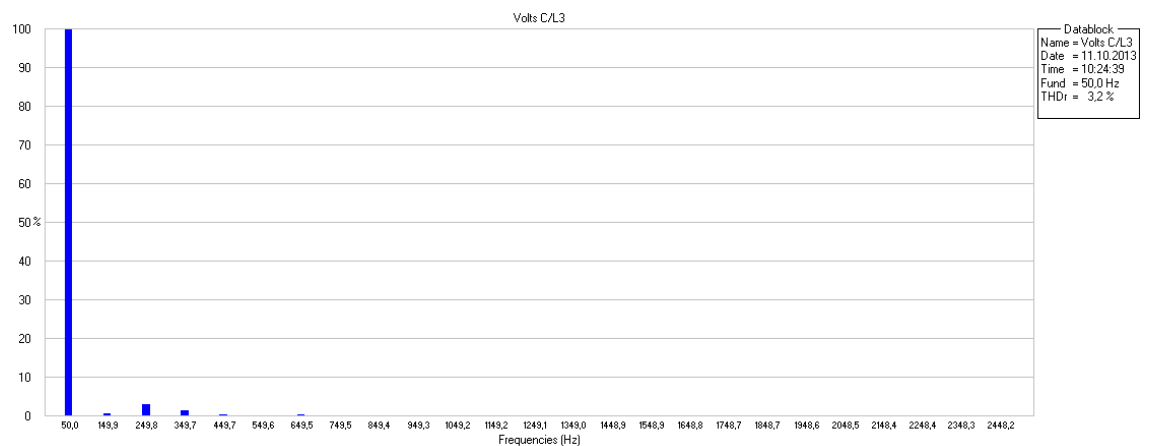
2(5)



KUVA 88. L2 jännite suurpainenaatriumlampuilla

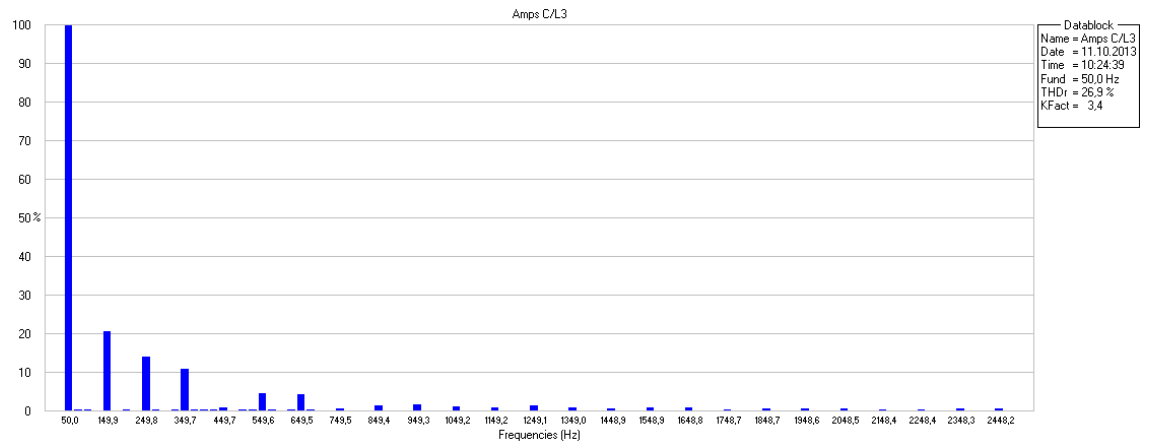


KUVA 89. L2 virta suurpainenaatriumlampuilla

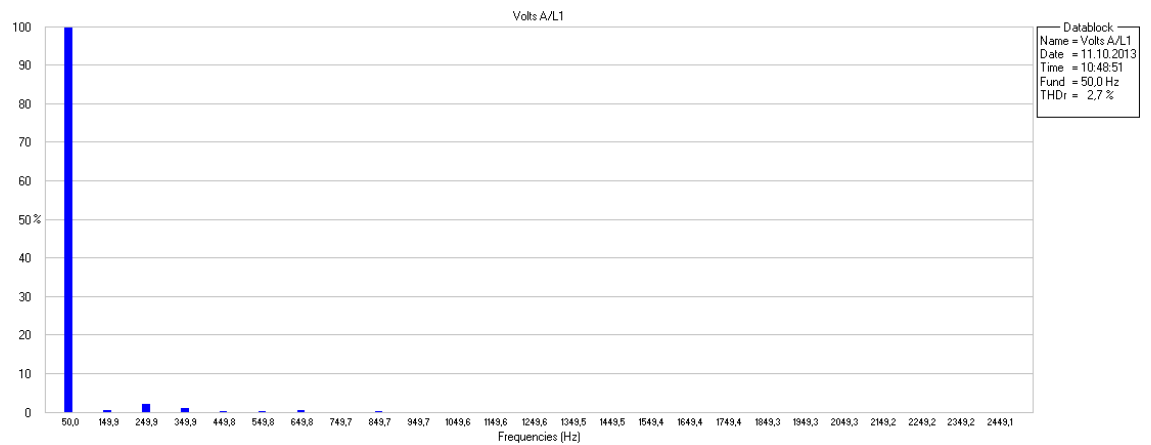


KUVA 90. L3 jännite suurpainenaatriumlampuilla

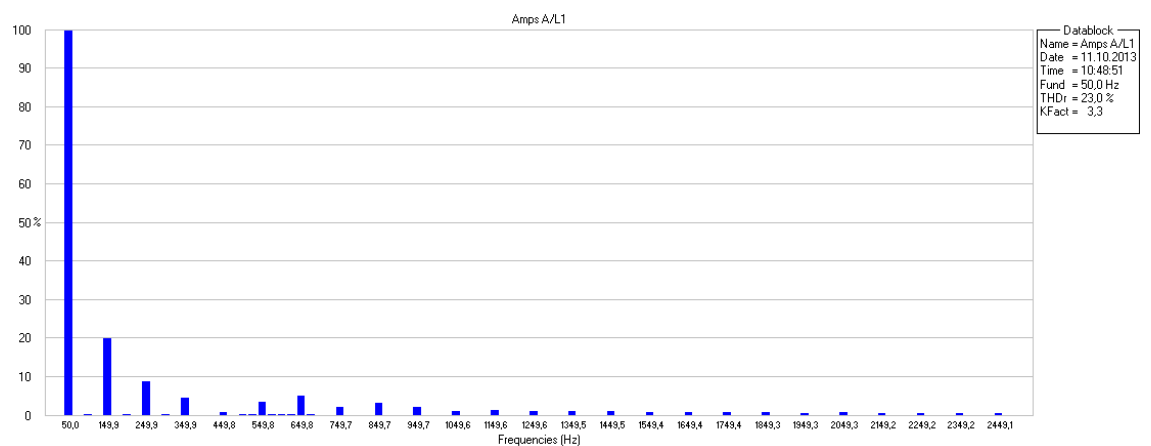
3(5)



KUVA 91. L3 virta suurpainenatriumlampuilla

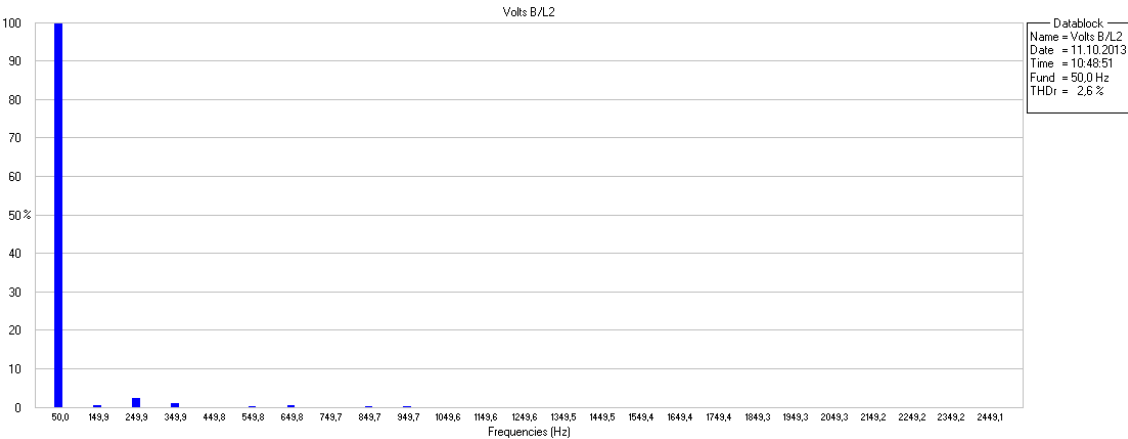


KUVA 92. L1 jännite loisteputkilla

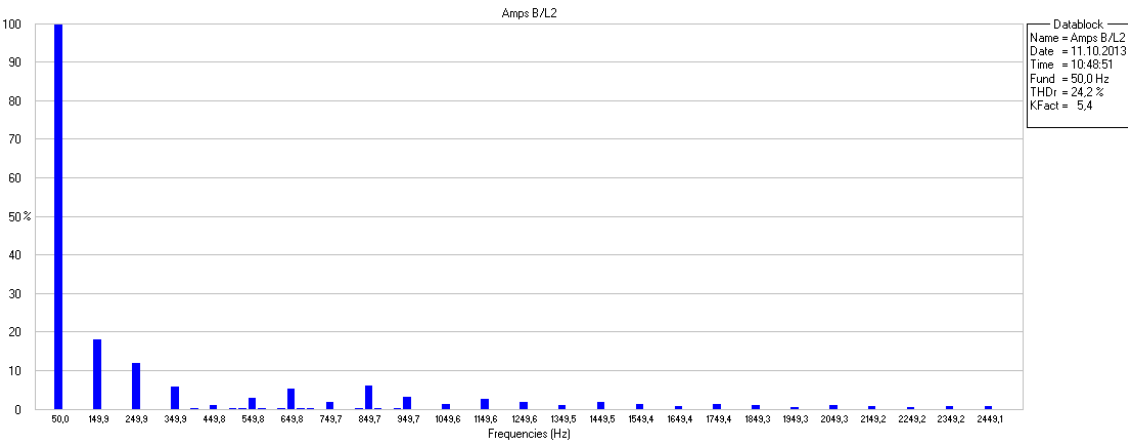


KUVA 93. L1 virta loisteputkilla

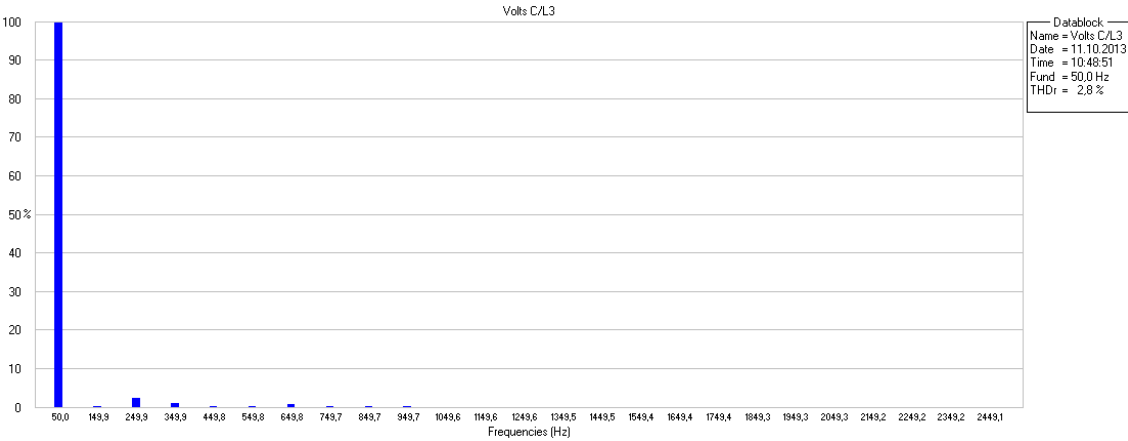
4(5)



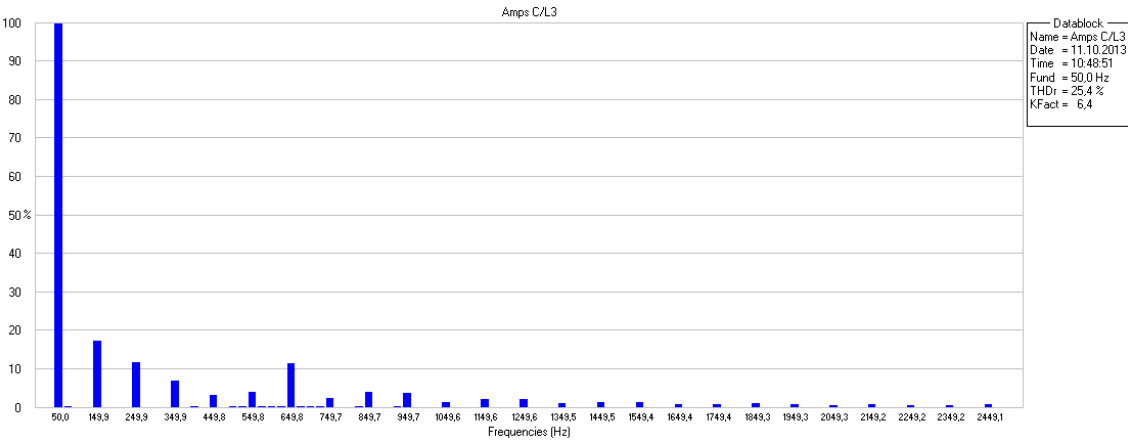
KUVA 94. L2 jännite loisteputkilla



KUVA 95. L2 virta loisteputkilla



KUVA 96. L3 jännite loisteputkilla



KUVA 97. L3 virta loisteputkilla